

Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires
Facultad de Ciencias Exactas
Grupo Flujos Geofísicos y Ambientales

**Tesis para optar al título de
Doctor en Física**

Por

NATALIA MUÑOZ VÁSQUEZ

**CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE UN EDIFICIO CONSTRUIDO
SEGÚN LOS ESTANDARES RECOMENDADOS PARA LA REGIÓN
CENTRO BONAERENSE - ESTIMACIÓN DE LAS PÉRDIDAS Y
GANANCIAS DE CALOR MEDIANTE EL DESARROLLO DE
MODELOS ESPECÍFICOS QUE CONTEMPLAN ANALISIS
INVERSO Y DIRECTO**

Directores:

Luis P. Thomas - Beatriz M. Marino

Febrero 2019

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. Introducción

1.1 Construcciones sustentables	1
1.2 Definición del problema	2
1.3 Objetivo general	4
1.4 Hipótesis de trabajo	6
1.5 Planteo de la tesis	7

2. Contextualización de la investigación

2.1 Antecedentes: uso de la energía	8
2.2 Primer paso: la caracterización térmica edilicia	11
2.3 Temperatura equivalente sol-aire	14
2.4 Simulación térmica de edificios	16
2.5 Ventilación natural	18
2.6 Confort térmico	22

3. Metodología

3.1 Descripción del edificio evaluado, ubicación geográfica y clima	26
3.2 Medición en campo	34
3.2.1 Monitoreo térmico del edificio	34
3.2.2 Termografía infrarroja	35
3.3 Método de la admitancia	39
3.4 Modelo de regresión lineal múltiple	40

4. Fundamentos teóricos

4.1 Técnica de termografía infrarroja (TTIR):	42
4.2 Método de la admitancia - Solución periódica de la ecuación del calor	45
4.2.1 Flujo de calor unidimensional en un medio no homogéneo	45
4.2.2 Flujo de calor en un medio semi-infinito	46
4.2.3 Flujo de calor en una placa plana ante variaciones sinusoidales de T_e	48
4.2.4 Aplicación: Flujo de calor a través de una pared plana	50
4.2.5 Factores de respuesta dinámicos	51
4.3 Modelos asociados con la radiación solar	53
4.3.1 Modelo de cielo claro	57
4.3.2 Modelo de Liu-Jordan	58
4.3.3 Comparación entre los modelos de cielo claro y de Liu-Jordan	60
4.4 Cálculo de la temperatura sol-aire	64

4.4.1 Evolución del flujo de calor y la temperatura en el interior de un muro considerando la radiación solar directa incidente	64
4.4.2 Modelo conceptual del intercambio radiativo nocturno	67
4.5 Transferencia de calor global: Método inverso	69
4.5.1 Modelo de regresión lineal múltiple	73
5. Cálculo de las pérdidas y ganancias de calor a través de la envolvente	
5.1 Aplicación del método directo	75
5.1.1 Estimación de las resistencias superficiales	75
5.1.2 Pérdidas de calor en invierno	78
5.1.3 Tiempo de respuesta térmica del edificio	80
5.2 Cálculo de los factores de respuesta dinámicos	84
5.3 Cálculo del flujo de calor a través de muros expuestos a radiación solar directa todo el día considerando $T_{\text{sol-aire}}$	87
5.4 Solución numérica de la ecuación del flujo de calor	91
5.4.1 Muro 1: doble pared con aislante central	91
5.4.2 Muro de ladrillo hueco revocado	99
5.4.3 Enfriamiento nocturno de los muros	102
5.5 Aplicación del método inverso	105
5.5.1 Aplicación del modelo de Regresión Lineal Simple	105
5.5.2 Aplicación del Modelo de Regresión Lineal Múltiple	111
6. Simulación del comportamiento térmico	
6.1 Descripción general del programa <i>EnergyPlus</i>	115
6.2 Selección de los datos de entrada	119
6.3 Resultados	122
6.3.1 Temperatura interna	122
6.3.2 Intercambio general de calor	124
6.3.3 Intercambio de calor a través de las superficies opacas	124
6.3.4 Intercambio de calor a través de las superficies vidriadas	132
6.4 Efecto de la ventilación natural	134
7. Discusión y Observaciones	
7.1 Análisis de las metodologías desarrolladas	137
7.2 Descripción térmica del edificio evaluado	144
7.3 Valoración de las normas técnicas	146
7.4 Propuesta de cambios para alcanzar el CT reduciendo el consumo energético	147
8. Conclusiones	150
Referencias	156

NOMENCLATURA

A	área (m^2)
C_d	número de difusión
C_p	calor específico ($\text{J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)
C_s	constante solar (W m^{-2})
C_ζ	capacidad calorífica de la zona térmica ζ ($\text{J }^\circ\text{C}^{-1}$)
C_{pa}	capacidad calorífica del aire ($\text{J }^\circ\text{C}^{-1}$)
d	aumento de temperatura debido a fuentes internas de calor ($^\circ\text{C s}^{-1}$)
D	difusividad térmica (m^2s^{-1})
e	espesor de una capa de material (m)
e_{cm}	error cuadrático medio
e_v	energía por unidad de volumen (W m^{-3})
E_v	iluminancia (lx)
f	factor de decremento
F	factor de visión
g	aceleración de la gravedad (m s^{-2})
h	coeficiente de transferencia de calor ($\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C W}^{-1}$)
h_c	coeficiente de transferencia de calor por convección ($\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C W}^{-1}$)
H	humedad absoluta (g m^{-3})
HR	humedad relativa (%)
I_{dif}	irradiancia solar difusa (W m^{-2})
I_{dir}	irradiancia solar directa (W m^{-2})
I_{ext}	irradiancia solar fuera de la atmósfera (W m^{-2})
I_{med}	intensidad de radiación solar total medida sobre una superficie terrestre horizontal (W m^{-2})
I_n	irradiancia solar directa normal (W m^{-2})
I_{ref}	irradiancia solar reflejada por el suelo (W m^{-2})
I_t	irradiancia solar total (W m^{-2})
I_r	energía radiante hemisférica total para los cuerpos grises (W m^{-2})
ℓ	ancho de la pared (m)
k	conductividad térmica ($\text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)
K	índice de claridad
m	masa (kg)
n	número de mediciones
N	número de capas que componen una pared
N_q	número de fuentes de calor

N_s	número de superficies que envuelven la zona térmica ζ
N_ζ	número de zonas adyacentes a la zona térmica ζ
p	presión (N m^2)
P	período (s)
q	flujo de calor por unidad de área (W m^{-2})
Q	flujo de calor (W)
q_e	flujo de calor por unidad de área que atraviesa la capa límite externa de aire (W m^{-2})
q_i	flujo de calor por unidad de área que atraviesa la capa límite interna de aire (W m^{-2})
q_{ss}	flujo de calor en estado estacionario por unidad de área (W m^{-2})
r	reflectancia
R	resistencia térmica ($\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C W}^{-1}$)
R_T	resistencia térmica total ($\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C W}^{-1}$)
Ra	número de Rayleigh
R_s	resistencia térmica superficial ($\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C W}^{-1}$)
t	tiempo (h)
T	temperatura ($^\circ\text{C}$)
T_c	temperatura efectiva del cielo ($^\circ\text{C}$)
T_r	temperatura del rocío
T_r	temperatura reflejada de fondo ($^\circ\text{C}$)
$T_{\text{sol-aire}}$	temperatura equivalente sol-aire ($^\circ\text{C}$)
u	transmitancia dinámica ($\text{W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)
U	transmitancia térmica global de una pared ($\text{W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)
U_T	transmitancia térmica global del edificio ($\text{W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)
v	velocidad del viento (m s^{-1})
x	coordenada espacial en la dirección del flujo de calor (m)
x^*	distancia de penetración en la pared (m)
X	distribución espacial de temperatura
Y	admitancia térmica ($\text{W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)
z	coordenada espacial vertical (m)

Letras griegas:

α	absorbancia
χ	tiempo de respuesta del edificio
Δ	diferencia
ε	emisividad

φ	tiempo de retraso (h)
λ	longitud de onda (μm)
Θ	distribución temporal de temperatura
ρ	densidad (kg m^{-3})
σ	constante de Stefan-Boltzmann ($\text{W m}^{-2}\text{K}^{-4}$)
τ	transmitancia
ω	frecuencia angular (s^{-1})
ζ	zona térmica

Sub-índices:

0	amplitud de una función periódica
c	relativo al cielo nocturno
e	valor externo
i	valor interno
j	interfase/capa de material
o	onda
r	conjuntos de datos de las variables medidas al mismo tiempo en el edificio evaluado
s	valor sobre una superficie
ss	estado estacionario

Abreviaciones más usadas:

CC/I	condiciones de contorno/ iniciales
C(H)I	confort (higro-)térmico
DVH	doble vidriado hermético
E	este
GEI	gases de efecto invernadero
IR	infrarroja/o
IRAM	Instituto Argentino de Racionalización de Materiales
MRLM	modelo de regresión lineal múltiple
N	norte
O	oeste
PA	planta alta
PB	planta baja
PEE	poliestireno expandido
S	sur
TTIR	técnica de termografía infrarroja

RESUMEN

Debido a los altos costos de producción y consumo de la energía, la caracterización apropiada del comportamiento térmico de los espacios habitables es una de las tareas más importantes para alentar el ahorro de energía mejorando la eficiencia de la gestión energética de los mismos. De aquí surge la importancia de la adaptación de los edificios al clima local, del empleo de materiales de construcción apropiados y del incentivo al uso de estrategias de ventilación natural para disminuir el consumo de energía sin afectar la calidad de vida de los ocupantes. El análisis de las mediciones de las variables térmicas efectuadas in situ durante un tiempo prolongado, de imágenes termográficas, de resultados de modelos físicos y matemáticos, y del conocimiento del microclima local y sus variaciones en diferentes escalas temporales, permite conocer con detalle los mecanismos físicos que actúan en forma combinada en la transferencia de calor y dinamizan los flujos de aire en edificios pre-existentes. Así se obtiene información fundamental para optimizar su funcionamiento higrotérmico integral, reducir apreciablemente el consumo energético global y aprovechar tanto los materiales disponibles como los recursos naturales de la radiación solar y la ventilación combinados con otras técnicas pasivas de enfriamiento y/o calentamiento.

La investigación realizada en el marco de esta tesis doctoral pretende, a través del análisis del intercambio de calor con el ambiente externo, proporcionar los fundamentos técnicos y metodológicos que permitan encontrar soluciones concretas y viables para reducir el consumo de energía en edificios en la zona geográfica en la que se encuentra Tandil. Esta ciudad constituye un adecuado caso de estudio por su ubicación, diversidad de tipos constructivos y cantidad de población cuyos usos y costumbres pueden contribuir a un ahorro sustancial de energía. El caso tomado como prototipo es el edificio de la Biblioteca Central de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires situado en la zona sub-urbana de la ciudad, cuya construcción es representativa de los estándares regionales recomendados por las normas IRAM. La descripción de su comportamiento térmico mediante el desarrollo de modelos físicos y matemáticos asociados con el análisis inverso y el habitual análisis directo así como la representatividad de los componentes constructivos de su envolvente edilicia permitirán contribuir al desarrollo del conocimiento y las estrategias que profundicen el mejoramiento del diseño, la construcción y la gestión de las construcciones en Tandil y zona de influencia. De esta manera, se espera contribuir a la reducción radical del consumo de energía destinado a climatización, la concientización sobre la falta de adecuación de los edificios en general a las características climáticas locales, y la creación de ambientes sanos y productivos, propendiendo al uso de diseños armoniosos desde lo estético pero que también contemplen la sustentabilidad energética.



AGRADECIMIENTOS

A mis directores, Dr. Luis P. Thomas y Dr. Beatriz M. Marino, por compartir conmigo su conocimiento y experiencia científica. También por brindarme su confianza, afecto, amistad y respeto, fundamentales para la realización de este trabajo.

Al Grupo de Flujos Geofísicos y Ambientales, al Instituto de Investigaciones en Física e Ingeniería del Centro de la Provincia de Buenos Aires y a la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, por brindarme el espacio para desarrollar mis actividades académicas y por resolver generosamente cuestiones administrativas y técnicas relacionadas.

A la Biblioteca Central por permitirme realizar en sus instalaciones el trabajo de campo, siempre dispuestos a colaborar con la mejor disposición.

A la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica y al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas por el otorgamiento de las becas que me permitieron dedicarme exclusivamente a la realización de mis actividades académicas y de investigación.

Al Dr. Ramón Tovar Olvera por compartir sus conocimientos y por su interés en mi trabajo y en general al grupo *Energías en Edificaciones* del *Instituto de Energías Renovables* de la Universidad Autónoma de México por su amabilidad y colaboración para realizar diferentes actividades durante mi estancia académica.

A mi familia. A mi mamá y mi abuela por su amor incondicional y por estimular desde pequeña mi interés por aprender. A quienes han sido mucho más que mis tíos Diego, Gloria y Carlos Alfonso por apoyarme siempre y creer en mí aun en los momentos más difíciles, y a mi tío Guillermo y su esposa Luz Mercedes por financiar mi carrera universitaria, sin cuya colaboración hubiera sido imposible llegar hasta aquí. A mi hermana Ana Lucía y mi prima Andrea quienes me motivan a ser su “ejemplo a seguir”, y al resto de mis primos por los buenos momentos compartidos.

A mi novio, Franco Schwindt, por su ternura y compañía.

En Colombia, agradezco al equipo de trabajo del *Centro de Producción más Limpia Eje-Cafetero* de la Universidad Tecnológica de Pereira, al Dr. Jorge A. Montoya y a MSc. Andrea H. Londoño, por integrarme desde el semillero de investigación como estudiante hasta ser profesional de apoyo y por motivarme para venir a Argentina. A la Universidad Tecnológica de Pereira por el conocimiento adquirido durante mi carrera de grado.

A las familias Zuluaga López, Zuluaga Galvis, Zuluaga González y a Ángel López porque siempre me han apoyado y demostrado su afecto. A mi mejor amiga Lic. Luisa F. Carmona Riaño por escucharme y aconsejarme. A Anabel, Tania, Diana y muchos otros amigos, amigas familiares y colegas porque en algún momento colaboraron con la causa y por los buenos momentos compartidos.

En Argentina, a Dr. Eugenia Zelaya, Dr. Marcelo Esquivel y Dr. Florencia Giordana del *Grupo de Metales* por compartir conmigo sus conocimientos en microscopía y por su acompañamiento durante mi estancia en el Centro Atómico Bariloche. En Tandil, a mis amigos y amigas del Grupos Scout *Almafuerte* y del equipo de natación de Escualo por interesarse por mis actividades y apoyarme. A mis amigas Mariana, Ingrith y Natacha por estar ahí siempre pendientes y por los buenos momentos compartidos y en general a todas la personas que he conocido durante estos años como estudiante extranjera y con las cuales he compartido diferentes momentos que me han enriquecido como persona y permitido conocer su cultura.



1. INTRODUCCIÓN

1.1 Construcciones sustentables

Una de las mayores preocupaciones actuales a nivel global compete a la provisión de energía, encontrándose el sector edilicio como uno de los principales demandantes de la misma. A partir de los continuos avances tecnológicos, el logro del confort higro-térmico resulta cada vez más relevante, llegando a configurarse como una exigencia ineludible para el óptimo gerenciamiento de los espacios cerrados, alentando la adquisición de equipos de aire acondicionado, estufas eléctricas, calefactores, etc. De aquí que el estudio del comportamiento térmico de los espacios habitables cobre importancia por la notable influencia que éste representa para el consumo energético. Como consecuencia, van surgiendo estrategias constructivas y nuevas tecnologías dedicadas al ahorro energético en edificios que eventualmente generarán una apreciable reducción global de la demanda de combustibles fósiles y de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas. Así, mejores prácticas de diseño contribuirán a enfrentar retos ambientales como el agotamiento de los recursos naturales, la eliminación de residuos y la contaminación de aire, agua y suelo, además de crear ambientes cerrados saludables.

Los términos *edificación sustentable*, *bioclimática*, *verde* o *ambientalmente consciente* se refieren a la utilización de prácticas respetuosas del medio ambiente (con ventaja ambiental o ambientalmente preferibles) relacionadas con la ubicación, diseño, construcción, operación y disposición final de los materiales de las edificaciones. Se aplica tanto a la construcción de nuevos edificios como a la renovación y re-acondicionamiento de los preexistentes, sean habitacionales o comerciales, públicos o privados. Numerosas investigaciones dan fe de los beneficios para la salud y la productividad derivados de características o elementos con ventaja ambiental como la iluminación diurna, una mayor ventilación con aire natural y la adecuación del índice de humedad, o bien el uso de elementos, pinturas y otros recubrimientos y accesorios de interiores de baja emisividad y/o toxicidad. La *construcción sustentable* puede, entonces, generar ahorros suficientes que logran compensar los costos adicionales iniciales, además de aumentar la productividad y el bienestar de sus ocupantes.

A pesar de las ventajas señaladas, la edificación sustentable constituye apenas un pequeño porcentaje de la industria de la construcción. Sólo en Estados Unidos y Canadá alrededor del 2% del mercado inmobiliario no habitacional nuevo y 0.3% del mercado habitacional corresponden a edificaciones con ventaja ambiental. Blasco Lucas (2008) alude a una serie de trabajos de investigación que permitieron determinar las estrategias apropiadas susceptibles de aplicar en los edificios de algunas zonas bio-ambientales de Argentina para lograr una mayor eficiencia energética, especialmente para calefacción. En concordancia con resultados internacionales, encuentra un

ahorro energético en climatización mayor al 30% y alcanzando hasta 95%, sólo con el empleo de sistemas pasivos tales como recurrir al aumento de niveles de aislación térmica en la envolvente, la hermeticidad a infiltraciones, y la gestión de la masa térmica y ganancia solar. También sugiere que es posible alcanzar un ahorro energético del orden del 70% aplicando sistemas pasivos y activos al parque nacional residencial construido. El sobre costo en la inversión inicial para la implementación de las mejoras sería de alrededor del 10%, con tiempos de recuperación variables de entre 5 y 10 años, aunque estos valores cambian significativamente por las condiciones económicas generales y particulares de cada región y estratos sociales. Luego, se infiere el enorme potencial para introducir mejoras en las construcciones de la región centro-bonaerense si se incluye además el ahorro energético en verano.

1.2 Definición del problema

Debido a los altos costos de producción y consumo de la energía, la caracterización apropiada del comportamiento térmico de los espacios habitables ya construidos es una de las tareas más importantes para alentar el ahorro energético y mejorar la eficiencia de la gestión energética de los mismos. Consecuentemente, los diseñadores e ingenieros deben adaptar los edificios al clima local, emplear materiales apropiados y promover el manejo inteligente de la ventilación de modo de disminuir el consumo de energía sin afectar la calidad de vida de los ocupantes.

Según una publicación del Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI, 2005), aproximadamente un tercio de la energía producida en Argentina es consumida en la gestión de los edificios. De esta cantidad, casi la mitad se utiliza para satisfacer la demanda de calefacción y refrigeración, mientras más del 30% del resto se pierde por los techos con deficiente aislación térmica y por ello proclives a fugas de calor en invierno o sobrecalentamiento en verano. Mundialmente, alrededor del 40% del consumo total de energía involucra las actividades humanas relacionadas con las edificaciones incluyendo el empleo de aparatos eléctricos e iluminación (UNEP-SBCI, 2009). Este gasto energético contribuye en 25-30% a las emisiones de CO₂, que representa el 19-22% de todas las emisiones y el 10-12% de la contribución humana al cambio climático por el calor retenido en la atmósfera.

Particularmente en Argentina, hemos sido testigos de cómo en los últimos lustros se batían records de consumo domiciliario (tanto de gas como de electricidad) en días con temperaturas extremas, la tendencia creciente de la construcción de viviendas del tipo ABC1, el incremento en la adquisición de equipos de aire acondicionado y estufas eléctricas, etc. Más recientemente, la situación se revirtió haciéndose indispensable el ahorro energético para compensar el elevado costo de la energía. Esto conforma una situación que requiere la inmediata atención tanto de las autoridades competentes como de los usuarios para generar conciencia que conduzca a disminuir el

consumo por medio de la construcción sustentable. Por lo tanto, la adecuada gestión de los recursos energéticos para garantizar la calidad del aire y el confort térmico en el interior de edificios debe incluir evaluaciones periódicas de las pérdidas y ganancias de calor, y la valoración de medidas que optimicen el desempeño energético de las construcciones de acuerdo con los avances tecnológicos y sus costos.

Una buena captación de la energía solar puede lograrse empleando amplias aberturas apropiadamente orientadas, y su conservación conseguida por medio de una adecuada aislación de la envolvente. Estos factores convenientes para el invierno implican un sobrecalentamiento indeseado del interior en verano tanto más grande cuanto mayor es el beneficio en invierno; es decir, el ahorro energético invernal se compensa con creces durante el estío. Resulta entonces imprescindible considerar simultáneamente el refrescamiento de los espacios interiores adaptados a cada región climática, a los usos y costumbres locales de construcción, y a los recursos disponibles. De este modo, se propiciará la disminución apreciable del consumo de energía requerido para mantener o mejorar el confort interior de las construcciones durante todo el año. A su vez, el ahorro energético general implica una disminución del consumo de combustibles fósiles cada vez más costosos y de la liberación de los GEI asociados.

Aunque la ventilación natural tiene el potencial de proveer un intercambio energéticamente eficiente de aire con el exterior, existen dificultades prácticas en el ambiente urbano (contaminación, inseguridad, isla de calor, etc.) que pueden disuadir al diseñador de elegir un sistema pasivo. De hecho, la investigación para mejorar los diseños de la ventilación pasiva surgió a partir de la consideración de la contaminación urbana con gases indeseados, partículas y ruido. Los estudios indican que la cantidad de esta contaminación es sustancial en el nivel de calle y disminuye a un nivel ambiental general arriba del techo (Laxen y Noordally, 1987). Las pequeñas diferencias de presión generados en los sistemas de ventilación natural hacen que la filtración de contaminantes sea frecuentemente baja. No obstante hay un problema de seguridad en áreas urbanas para encontrar un lugar seguro en los niveles bajos donde instalar las aberturas de entrada de la ventilación requeridas en los sistemas pasivos ya que éstas deben dejarse abiertas durante la noche si el espacio va a ser enfriado con un riesgo real de robo (Kukadia, 1997). Además, si no se elige cuidadosamente la ubicación de estas aberturas, puede surgir un problema de ganancia térmica ya que las ciudades son construidas con materiales que absorben y mantienen el calor (e.g. asfalto, empedrados, muros externos). Las áreas que enfrentan el oeste retienen calor en los atardeceres y muchas partes de una ciudad no son fuentes efectivas de aire frío. Todos estos problemas condicionan las soluciones prácticas que deben adaptarse a cada zona en particular.

Por otra parte, existe una gran diversidad de normas, reglas prácticas, planillas de cálculo y programas de simulación numérica para estimar, durante la etapa de diseño, el intercambio energético de una construcción. La optimización del consumo de energía se encara eventualmente

mediante algunos intentos de prueba y error sobre resultados teóricos promedios o mediante simulaciones. Sin embargo, la edificación ya terminada no siempre se ajusta al proyecto arquitectónico, sea por los materiales elegidos, los métodos de construcción efectivamente empleados y/o la gestión realizada por los ocupantes resultando que el consumo energético dista mucho de los mínimos esperados. El análisis de las mediciones de las variables térmicas efectuadas in situ durante un tiempo prolongado, de imágenes termográficas, y de resultados de modelos físicos, matemáticos y estadísticos, junto con el conocimiento del microclima local y sus variaciones en diferentes escalas temporales, nos permite conocer con detalle los mecanismos físicos que actúan en forma combinada en la transferencia de calor y dinamizan los flujos de aire en edificios pre-existentes. Así se obtiene información fundamental para optimizar el funcionamiento higrotérmico integral de los mismos, reducir apreciablemente el consumo energético global y aprovechar tanto los materiales disponibles como los recursos naturales de la radiación solar y la ventilación combinados con otras técnicas pasivas de enfriamiento y/o calentamiento. No obstante, debe considerarse que, si bien los sistemas pasivos se adaptan a una situación externa promedio, no siempre responden adecuadamente a cambios importantes de las condiciones ambientales. Para que ello ocurra se requieren diferentes estrategias para cuyo mejor aprovechamiento se recurre a la ventilación natural por desplazamiento o convectiva.

1.3 Objetivo General

Tandil es una ciudad pujante, moderna, de emprendedores, con una masa poblacional en constante crecimiento, y centro de variadas actividades agropecuarias e industriales desarrolladas por medio de PyMEs que desempeñan un importante rol dinámico en la economía de la región. Desde hace casi dos décadas viene mostrando un desarrollo edilicio significativo que se ha materializado en una extensión del área céntrica y el avance de nuevos barrios hacia la zona rural. Alentada por la belleza del paisaje serrano y el crecimiento de la UNCPBA, la urbanización es estimulada por la llegada de familias desde la zona metropolitana en busca de una mejor calidad de vida, y por numerosos estudiantes dispuestos a aprovechar las ventajas educativas de una oferta universitaria más personalizada. Sin embargo este crecimiento demográfico no es acompañado convenientemente por un desarrollo edilicio que priorice la conservación de las características habitacionales que alentaron primariamente la elección de Tandil como lugar para vivir o insertarse profesionalmente. En la zona céntrica proliferan los edificios de numerosos departamentos mono- o bi-ambientes de dimensiones reducidas destinados principalmente a estudiantes en desmedro de los espacios verdes (o pulmones de manzanas). En las laderas de las sierras abundan las viviendas de clases sociales medias y altas dotadas de amplios ventanales de vidrio, sin cortinas o persianas, que si bien son estéticamente estilizados y exhiben detalles de modernidad, resultan ser extremadamente

calurosos en verano y fríos en invierno con el consecuente gasto energético para mantener su confort interior. Hacia el norte y oeste, se extienden los barrios de casas bajas con condiciones desventajosas para afrontar el crudo invierno local y los rigores del verano.

La aprobación del Plan de Ordenamiento Territorial en 2007 marcó un punto de inflexión en el uso de la tierra redefiniendo zonas de acuerdo a los destinatarios y actividades. Si bien la autoridad municipal exige el cumplimiento de pautas generales de construcción (e.g. factor de ocupación del suelo, factor de ocupación total, retiros de la línea municipal), la sustentabilidad energética reside en normas provinciales. El cumplimiento de estas normas es exigido sólo para el diseño, se basan en valores medios de los parámetros meteorológicos y supuestos generales, y en consecuencia logran parcialmente su cometido debido a una combinación de múltiples factores difíciles de controlar. Como consecuencia, predominan las edificaciones tradicionales de bajo costo constructivo cuya gestión requiere de un significativo gasto energético incrementado por las variaciones climáticas locales.

La investigación realizada en el marco de esta tesis doctoral pretende, a través del análisis del intercambio calórico con el ambiente externo, proporcionar los fundamentos técnicos y metodológicos que permitan encontrar soluciones concretas y viables para reducir el consumo de energía en viviendas y edificios públicos en la zona geográfica en la que se encuentra Tandil. El caso tomado como prototipo es el edificio de la Biblioteca Central de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA) situado en su Campus, en la zona sub-urbana de la ciudad. El mismo involucra una geometría y una volumetría peculiares y responde a un uso específico cuyos sistema constructivo, componentes y materialidad (muros, techos y aberturas) son los recomendados por las normas IRAM para la región centro-bonaerense. En consecuencia, el análisis detallado de sus componentes edilicias puede constituir una base de información representativa aplicable a otras edificaciones. Si bien ya existen profuso conocimiento y estrategias generalizadas de mejoras a tener en cuenta en la construcción de edificios de esta envergadura, es necesario promover la concientización sobre la falta de adecuación de los edificios en general a las características climáticas locales, y propender al uso de diseños armoniosos desde lo estético pero que también contemplen la sustentabilidad energética. De aquí, el objetivo general propuesto fue:

Desarrollar el conocimiento y las estrategias que profundicen el mejoramiento del diseño, la construcción y la gestión de edificios en Tandil y zona de influencia a fin de reducir radicalmente el consumo de energía destinado a climatización aprovechando los recursos naturales de iluminación y ventilación, y crear ambientes sanos y productivos. Tales avances son posibles encontrando los fundamentos derivados de la comprensión de la especificidad de la dinámica termo-física del edificio evaluado y del modelado de la misma con métodos directos e inversos.

1.4 Hipótesis de trabajo

La hipótesis principal de mi investigación es que actualmente no existe conciencia suficiente sobre las ventajas de la “construcción ambientalmente consciente” ni en los arquitectos, constructores y autoridades ni en los usuarios en general, como en otras regiones del mundo para generar un significativo ahorro colectivo de energía. Esto a pesar de que se cuenta con una cantidad importante de conocimientos relacionados en el ámbito académico, aunque poco difundidos para su aplicación a casos concretos en forma sencilla. Por otra parte, la oferta de materiales, accesorios y estrategias asociadas a la edificación con ventaja ambiental se encuentra muy dispersa en calidad, accesibilidad y costo, y no siempre está bien adaptada a los usos y costumbres locales de construcción. El uso generalizado de materiales y equipos de construcción eficientes junto con cambios en la gestión de un edificio, en el diseño de los nuevos y en la aislación y ventilación de los ya construidos, junto al adecuado financiamiento, pueden conducir a una mayor aceptación de los edificios energéticamente sustentables al reducir drásticamente la cantidad de energía necesaria para su operación. Esto ayudará a generar una economía sostenible con bajas emisiones de carbono, utilizando los recursos de forma más eficiente y socialmente incluyente, de acuerdo a las directivas y acuerdos internacionales. Tandil es un adecuado caso de estudio por su ubicación, diversidad de tipos constructivos y cantidad de población cuyos usos y costumbres pueden contribuir a un ahorro sustancial de energía.

La investigación desarrollada se basa en la información obtenida de la evaluación térmica del prototipo y del análisis de su eficiencia energética mediante el cálculo del flujo de calor a través de la envolvente edilicia. Es de esperar que el uso de los principios proporcionados por la física del movimiento del aire y el transporte del calor, combinados con el desarrollo de modelos matemáticos basados en el análisis inverso y el habitual análisis directo, nos permita generar conocimiento sustantivo o profundizar el ya disponible para que los arquitectos y constructores trabajen sobre el diseño adecuándolo a las características climáticas locales y contribuyan a la reducción del consumo energético de la edificación. De aquí que se propongan los siguientes

Objetivos específicos:

- ♣ Analizar y cuantificar el flujo de calor intercambiado con el exterior a través de la envolvente del edificio evaluado, distinguiendo las contribuciones de los procesos clásicos de transferencia (conducción, radiación y convección por efecto del viento), y utilizando información proporcionada por el monitoreo térmico.

- ♣ Desarrollar modelos analíticos para dar cuenta del intercambio calórico con el exterior a través de los muros para proveer una explicación del comportamiento térmico global de la construcción.

♣ Identificar los aspectos críticos de la construcción susceptibles de ser mejorados y que contribuyan a disminuir el gasto energético atendiendo las condiciones meteorológicas locales, el lugar de construcción, los materiales usados y el uso de las instalaciones.

♣ Efectuar el modelado numérico del comportamiento térmico del edificio a partir del cual se puedan validar mejoras a la construcción.

1.5 Planteo de la tesis

En §2 se contextualiza la investigación desarrollada atendiendo su inserción en el conjunto de ítems que definen los criterios de *sustentabilidad edilicia*, los que no necesariamente se inscriben en los de *sustentabilidad energética*. Se describen los fundamentos de la caracterización térmica y se introducen algunos pilares que la hacen posible (e.g. empleo de la temperatura equivalente sol-aire, simulación numérica). También se introduce la ventilación natural como recurso indiscutible para mejorar la eficiencia energética de cualquier construcción.

La descripción del edificio evaluado, de los instrumentos empleados y de las técnicas aplicadas se presentan en §3. En §4 se desarrollan los fundamentos teóricos sobre los que se basan los diferentes modelos y metodologías usados. Los resultados de los cálculos de las pérdidas y ganancias de calor por conducción a través de la envolvente a partir de las mediciones de campo se encuentran en §5. En §6 se presentan los resultados del modelado numérico del comportamiento térmico del edificio para algunas situaciones de interés realizado con el programa *Energy Plus*. Finalmente, en §7 se procede a realizar el análisis integrado de todos los resultados obtenidos, mientras las conclusiones de la investigación se presentan en §8. El listado de las referencias aludidas se encuentra al final de la tesis.



2. Contextualización de la investigación

2.1 Antecedentes: uso de la energía

El aumento del consumo de energía es una característica recurrente en la evolución de nuestra civilización. El hombre primitivo no tenía más que la energía de sus músculos. El alimento que comía le proveía las calorías necesarias para caminar, correr y realizar tareas múltiples. En su evolución, el hombre de las cavernas inventó algunas herramientas para aliviar sus labores. Descubrió el fuego y al quemar leña liberó la energía que contienen los vegetales. Aprendió luego a elaborar el carbón vegetal apropiándose de un factor de confort puesto que las brasas de carbón no producen el tan molesto humo cuando se lo emplea para cocinar en interiores. Siglos más tarde, incorporó caballos y bueyes al trabajo, pudiendo disponer de más fuerza y, por primera vez, contó con fuentes externas a su cuerpo. Este fue un extraordinario descubrimiento que le permitió conocer los beneficios de disponer de cantidades mayores de energía. Después del carbón vegetal, apareció el mineral y una nueva industria se desarrolló en su entorno. El carbón mineral tiene, en términos generales, más energía por kg que la leña o el carbón vegetal (2 kg de leña dan casi el mismo calor que 1 kg de carbón mineral). Rápidamente, comenzó a usarse este nuevo combustible el que, a pesar de ensuciar y dejar más hollín, evitaba el doble trabajo de buscar y cortar leña. Al utilizarse la mitad de kilogramos con igual resultado, su empleo se masificó. En el siglo XIX se puso en funcionamiento la máquina de vapor, que entregaba una cantidad de fuerza muy superior a la de los animales de carga. Desde entonces la carrera tecnológica para poner en marcha fuentes que ofrecen más energía a menor costo no se ha interrumpido.

Por su parte, el petróleo aparecía de forma natural en los países de Oriente Medio desde la antigüedad. Hace 6000 años en Asiria y en Babilonia se usaba para pegar ladrillos y piedras, en medicina y en el calafateo de embarcaciones; en Egipto, para engrasar pieles; las civilizaciones precolombinas mexicanas pintaron esculturas con él; y los chinos ya lo utilizaban como combustible. La primera destilación de petróleo se atribuye al sabio árabe de origen persa Al-Razi en el siglo IX, inventor del alambique, con el cual obtenía queroseno y otros destilados, para usos médicos y militares. Los árabes difundieron estas técnicas por toda Europa a través del Califato de Córdoba (actual España). En el siglo XVIII, los métodos de refinado empezaron a perfeccionarse obteniéndose productos derivados que luego se utilizarían principalmente para el engrasado de máquinas. En el siglo XIX se lograron obtener aceites fluidos para usarse en el alumbrado. En 1859 Edwin Drake perforó el primer pozo de petróleo en Pensilvania. La aparición de los motores de combustión interna abrió nuevas e importantes perspectivas en la utilización del petróleo, sobre todo en uno de los productos derivados, la gasolina, que hasta entonces se había desechado al no encontrarle una

aplicación práctica. A principios del siglo XX comenzó el uso intensivo de este hidrocarburo que, al ser líquido, resulta sencillo de transportar y almacenar y tiene mayor poder calórico por kilogramo que el carbón. Las mejoras en su aprovisionamiento y transporte facilitaron la alimentación de calderas y de otras fuentes generadoras de calor. Estas características llevaron a que, en sólo tres décadas, el consumo de petróleo desplazara totalmente al carbón en los usos industriales y domésticos. Sobre la base de consumos mayores cada año (hasta transformarse en abusivos) y a costa de profundizar el daño ambiental, la humanidad fue mejorando su calidad de vida. Ahora que las reservas de petróleo escasean, su producción y accesibilidad también son más costosas. Desde el inicio del desarrollo tecnológico en el siglo XX se hicieron las cosas sin pensar demasiado en los hidrocarburos que se gastaban ni en sus efectos nocivos. Pero en los umbrales del siglo XXI nos encontramos ante el nuevo desafío de lograr eficiencia en el uso de esos combustibles y también de otras energías. Una forma de contribuir a la racionalidad del gasto energético es disminuyendo el consumo de energía en viviendas y edificios.

En Argentina, particularmente en los ámbitos cotidianos o poco entrenados, no es claro si por sustentabilidad se entiende la aplicación de mayor tecnología para procurar el ahorro energético y la reutilización de aguas o el aprovechamiento de las buenas orientaciones, asoleamiento, parasoles, ventilación natural cruzada, muros bien aislados y envolventes verdes. Aquí debe observarse que el diseño sustentable incluye considerar la calidad de vida, la calidad ambiental, la salud humana, la salud del edificio, la eficiencia energética y los costos de construcción, y por lo tanto la problemática energética asociada con la definición de los niveles de sustentabilidad suele abordarse de manera reduccionista. También deben considerarse las limitaciones de las normativas con certificación y etiquetado basadas en conceptos de otros países, que sólo tienden a satisfacer requisitos del mercado inmobiliario en forma indirecta y lenta. En su lugar, deberíamos proceder a los usos y costumbres de nuestra zona geográfica, de nuestros conocimientos sobre los materiales disponibles y su tecnología. Un ejemplo de lo primero es la certificación *Leed* (2018) que premia a los edificios con sistemas de refrigeración tipo *roof top* con refrigerantes ecológicos, pero no hace lo mismo con los proyectos que, por estar bien asoleados y bien ventilados, no requieren equipos de tales magnitudes. En el mismo caso, quien usa grandes cantidades de lámparas de leds es premiado, mientras que el que usa iluminación natural, reduciendo así la cantidad de artefactos, no. (Rodríguez Alonso, 2013)

Desde el Instituto Argentino de Racionalización de Materiales (IRAM) se impulsan reglas que no son de carácter obligatorio pero que sientan las bases para la oficialización de las mismas. Sin embargo, ningún código de edificación establece criterios claros sobre sustentabilidad. Hay ciertos acercamientos al respecto en el ámbito de la Provincia de Buenos Aires y es inminente su incorporación en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA). Un caso es el de la Ley 13059 de la provincia de Buenos Aires que establece las condiciones de acondicionamiento térmico exigibles en

la construcción de los edificios para contribuir a una mejor calidad de vida de la población y a la disminución del impacto ambiental a través del uso racional de la energía. Como aspectos positivos, puede decirse que los sistemas de certificación deben tomarse en cuenta como un estándar de construcción para mejorar la calidad de las incumbencias profesionales, aunque no reflejan necesariamente una buena calidad arquitectónica. Las iniciativas de la CABA para ahorrar agua en los consorcios a través del uso de pistolas de corte de flujo en el extremo de las mangueras cuando se lavan las veredas no se cumplen, en parte, por la falta de controles. La instalación de tanques ralentizadores de agua de lluvia evitaría inundaciones y podría también reutilizarse para limpieza. Por otro lado, se podría pensar en financiar mejoras de la eficiencia energética (i.e de la aislación térmica), la construcción de cubiertas verdes y el reemplazo de carpinterías. (Rodríguez Alonso, 2013)

El mejoramiento de la habitabilidad, el uso eficiente de los recursos (ambientales, hídricos, tecnológicos, etc.), la optimización de la eficiencia térmica de la envolvente, la sustitución de fuentes de energía convencionales por otras limpias y renovables, etc., son acciones que tienen el objetivo de reducir los consumos de todos los recursos –no sólo del energético– y pueden efectivizarse de diferentes maneras como, por ejemplo, mediante:

- + La colocación en la azotea de paneles solares con el fin de calentar el agua de los sanitarios; ésta luego se conserva caliente en depósitos aislados térmicamente, reduciendo el consumo de gas.

- + El uso de paneles solares para generar electricidad.

- + La incorporación de sistemas para filtrar y colorear las descargas secundarias –provenientes de lavatorios y cocinas–, y que luego pueden reutilizarse como agua no potable para los inodoros. Este sistema produce un ahorro en el consumo de agua de más del 50%.

- + La disminución de la conductividad térmica de la envolvente edilicia para reducir el consumo de energía destinada a la climatización de las instalaciones.

- + La maximización del aprovechamiento de las horas de luz, radiación solar y ventilación natural.

- + La utilización de sistemas de fachada ventilada sobre el contrafrente para sombrear los muros expuestos al sol y/o aprovechamiento de la sombra generada por la vegetación circundante para refrescamiento en verano (para disminuir el uso del aire acondicionado).

- + La implementación del enfriamiento evaporativo.

- + La incorporación de chimeneas solares y muros *trombe* en el diseño para disminuir la energía requerida en invierno.

- + El uso del gas generado por la biomasa.

- + El empleo de hornos y secadores solares de ropa, alimentos, etc.

- + La disposición de techos verdes para aumentar la aislación horizontal, disminuir la isla de calor urbana y la retención de excesos hídricos repentinos.

- + El desarrollo y empleo de energía eólica.
- + El desarrollo y empleo de energía geotérmica.

2.2 Primer paso: la caracterización térmica edilicia

Previamente a considerar cualquier propuesta de mejora, es conveniente realizar una evaluación térmica del edificio en cuestión. La forma usual de evaluar el comportamiento térmico es integrando los aportes de las diversas componentes de la envolvente (e.g. muros, aberturas, techos, etc.). Para ello es necesario discernir como contribuye cada proceso de transmisión del calor (e.g. conducción, convección, radiación) y la acumulación de energía en el interior y en las paredes. Esto puede hacerse mediante aproximaciones ya que, en la práctica, los flujos de calor asociados con cada mecanismo de transferencia no son independientes. En efecto, en el intercambio de calor entre una superficie y el ambiente se solapan los flujos radiativos y convectivos, debiendo considerarse la absorción de onda corta en la radiación (ya sea la procedente del sol o de las fuentes presentes), la de onda larga originada en las superficies del entorno exterior, y la radiación infrarroja emitida por la superficie interna y reflejada por el resto de los elementos. Los flujos convectivos de calor dependen de si el movimiento del aire es impulsado por el viento o por diferencias de densidad. A su vez, en la transmisión de calor por conducción, debe considerarse que la envolvente se compone de capas de diferentes materiales con propiedades físicas distintas, y en algunos casos existen puentes térmicos¹. La conducción también es afectada por la generación transitoria de sumideros y fuentes de calor por pérdida o acumulación de energía en el interior de las paredes. Otro factor que suma dificultad es el comportamiento térmico de los cerramientos, que resulta complejo de evaluar.

En el contexto descrito hasta aquí, la detección y cuantificación de las pérdidas a través de la envolvente edilicia adquiere especial relevancia. En Argentina estas pueden estimarse utilizando las normas IRAM Nº 11549, 11601, 11603, 11604, 11605, 11625, 11630, 11507-1 y 11507-4 (www.iram.org.ar) relacionadas con el acondicionamiento térmico de edificios y, en particular en la Provincia de Buenos Aires, contempladas en la Ley 13059 de cumplimiento obligatorio para construcciones nuevas y remodelaciones de más del 50% de la superficie, para todo edificio de uso público o privado (IVBA, 2014; Lanzetti 2014), siguiendo los métodos allí establecidos para el cálculo de los valores normalizados de las resistencias térmicas de los materiales y de la capa de aire próxima a la superficie. Luego, las normas IRAM establecen los valores globales de los parámetros característicos para los materiales usados en edificaciones y la forma estandarizada de calcular el intercambio de calor debido a los diferentes procesos de transmisión para las distintas zonas bioclimáticas. Puesto que los cálculos corresponden a condiciones climáticas extremas, tales valores de los parámetros edilicios son adecuados para estimaciones previas a las etapas de construcción, y

¹ Materiales o defectos que transmiten más fácilmente el calor debido a una menor resistencia térmica.

pueden cambiar debido a las características intrínsecas del diseño, variedad y actualización de materiales ofrecidos, envejecimiento, características geográficas, etc. En el caso de edificios antiguos, el estudio energético se complica por la carencia de información sobre ellos implicando la necesaria determinación del flujo de calor entre los ambientes y con el exterior. No obstante, los resultados determinan la categoría de la eficiencia de la aislación entre los niveles A y H, establecida por la norma IRAM 11900. En la provincia de Buenos Aires, las normas asociadas con el acondicionamiento térmico de edificios conducente a un consumo energético reducido en invierno vienen dadas por la Ley Nº 13059 y el Decreto 1030/2010. Además, la norma IRAM 11659-2 establece valores admisibles de calidad térmica para edificios con sistemas de refrigeración. En nuestra investigación, los parámetros característicos de los materiales indicados por las normas IRAM se emplean como referencia en los cálculos de flujos de calor.

La caracterización térmica de un edificio no sólo involucra la transferencia de calor a través de la envolvente sino también su capacidad calorífica global o “masa térmica”. La energía almacenada en la envolvente edilicia puede cuantificarse, pero la energía real acumulada o liberada en todo el edificio es más difícil de calcular porque involucra la masa térmica interior y su distribución, las fuentes térmicas internas y las condiciones reales de uso del edificio. Si se conocen los valores de todos los parámetros edilicios involucrados, entonces el comportamiento térmico de una construcción puede determinarse resolviendo las ecuaciones diferenciales y/o integrales que rigen los procesos de transferencia de calor con las condiciones iniciales (i.e., la distribución inicial de temperatura en todos los componentes) y de contorno (i.e., la evolución de las condiciones del tiempo en el exterior)² adecuadas. Si no es posible obtener una solución analítica, puede recurrirse a códigos de simulación como los indicados en §2.4.

El procedimiento empleado en el diseño y etiquetado de las edificaciones, basado en la resolución analítica o numérica de las ecuaciones que contemplan los procesos físicos involucrados (líneas negras en Figura 2-1), se conoce en general como “resolución del *problema directo*”. Un aspecto crítico del cálculo lo constituyen las incertezas de los parámetros físicos y coeficientes semi-empíricos presentes en las ecuaciones. Si bien estos son provistos por las normas IRAM para materiales y aberturas típicas, sus valores pueden diferir de los reales ante la presencia de pérdidas o ganancias de calor imprevistas o por la ocurrencia de otros factores difíciles de cuantificar asociados con la envolvente, el entorno o el clima local. Además, no siempre es posible evaluar la contribución combinada (no lineal) de los procesos de transferencia.

En consecuencia, los valores de los parámetros a veces deben ajustarse por un proceso de “prueba y error” para determinar el comportamiento térmico del edificio en condiciones reales de uso. Un modo alternativo de trabajo consiste en resolver el *problema inverso* (Trujillo y Busby, 1997;

² El tiempo es el estado de la atmósfera en un determinado sitio y lapso mientras que el clima se refiere a las condiciones atmosféricas promedio de un sitio durante un periodo largo.

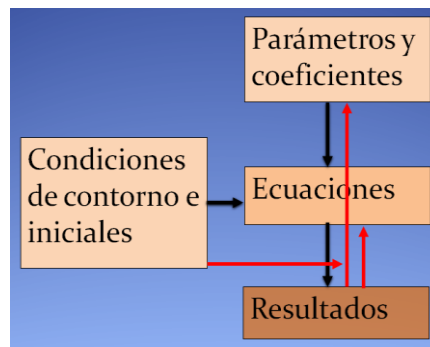


Figura 2-1: Etapas de la resolución directa (líneas negras) e inversa (líneas rojas) del problema asociado a la caracterización térmica de un edificio.

Woodbury, 2002; Ozisik y Orlande, 2000; Grysa, 2011, entre otros) que implica obtener los valores de los parámetros del modelo y/o la información general de los procesos físicos a partir de los resultados o consecuencias (líneas rojas en Figura 2-1). Esta técnica es útil también para validar o corregir los valores de los parámetros empleados si estos fueran conocidos, o para obtener información complementaria del problema que se intenta resolver.

Si bien existen numerosos métodos para encarar los problemas inversos de la física (Tarantola 2005), se encuentran escasas referencias de casos aplicados al comportamiento térmico de las construcciones (Kramer et al. 2012, 2013) como se hace en esta tesis. Implementamos una metodología para cuantificar las pérdidas y ganancias globales de calor por conducción, radiación y convección causadas por el viento en el edificio tomado como caso de estudio mediante mediciones sistemáticas realizadas con sensores de temperatura en el interior del mismo, y los registros de los parámetros meteorológicos externos. Basada en los principales procesos físicos involucrados en la transferencia de calor, se encuentra una relación entre las variables externas e internas y los parámetros térmicos globales del edificio para así determinar las contribuciones de los diferentes mecanismos de intercambio de calor con el exterior. El procedimiento tiene la ventaja de obtener los valores promedio de los parámetros bajo condiciones reales de uso en el sitio mismo de la construcción. Los resultados son cotejados con los obtenidos resolviendo el *problema directo* estandar, es decir, aquel que implica encontrar los parámetros típicos de los materiales empleados empleando las normas IRAM y luego sumar los flujos de calor de cada componente de la envolvente edilicia.

Otro aspecto crucial de la caracterización térmica es la forma en la que se intercambia energía a través de la envolvente edilicia. En particular, el estudio de la conducción térmica a través de las paredes fue profuso y condujo al desarrollo de herramientas que posibilitaron notorios avances en la gestión energética de los edificios. A fin de simplificar los cálculos asociados con la transferencia de calor, es frecuente emplear aproximaciones como la conducción térmica unidimensional *estacionaria* a través de la envolvente. En estado estacionario, el flujo de calor se determina a partir de la ley de Fourier y depende de la diferencia de temperatura entre las dos caras de la pared y de la

conductividad de los materiales de construcción. Para Argentina, los valores comunes de conductividad son listados en la norma IRAM 11601. Generalmente, la envolvente se compone de muros contruidos por capas de diferentes materiales y propiedades físicas, las aberturas y el techo. Como consecuencia de la complejidad involucrada en los cálculos, el comportamiento higró-térmico de un edificio suele determinarse empleando códigos de simulación basados en modelos que dan cuenta de los principales fenómenos físicos, a partir de los cuales es posible reproducir la evolución temporal de la temperatura interna para diferentes condiciones externas.

Puesto que es usual que las diferentes partes de la envolvente se comporten de modo disímil, la resolución del problema directo a partir de la estimación de los parámetros, o del problema inverso a partir de mediciones, constituyen solo aproximaciones para evaluar la transferencia de calor. Mientras que en los ventanales y muros delgados con gran conductividad y poca masa térmica el flujo de calor se ajusta casi instantáneamente a la diferencia de temperatura entre las caras externa e interna, el flujo de calor que ingresa al interior por los gruesos muros compuestos no sigue la misma evolución que dicha diferencia. Ni los modelos numéricos simples ni las normas IRAM contemplan este fenómeno. Por ejemplo, las normas IRAM 11601 (relativa al método de cálculo), 11604 (relacionada con el ahorro de energía en calefacción) y 11659 (asociada con el ahorro de energía en refrigeración), entre otras, se basan en las propiedades térmicas de los componentes de construcción en régimen estacionario para evaluar el aislamiento térmico de los edificios.

Además de las resistencias térmicas de los materiales empleados en las edificaciones, deben considerarse las resistencias térmicas superficiales de las capas límites de aire próximas a las superficies exterior (R_{se}) e interior (R_{si}) de la envolvente. Para facilitar los cálculos, las normas establecen valores constantes de R_{se} y R_{si} (Tabla 2.i), aunque pueden variar con las diferencias de temperatura y humedad, la intensidad y dirección del viento, la forma de la envolvente, el entorno, etc. La importancia del cálculo de estas resistencias suele subestimarse respecto de otros efectos como, por ejemplo, el de los parasoles y entrantes en las fachadas para reducir la incidencia de la luz solar en verano sin perderla en invierno (Ledesma et al., 2004; Kumar y Kaushik, 2005; Tzempelikos y Athienitis, 2007; Barnaby et al., 2009). En este trabajo, R_{se} y R_{si} de los componentes constructivos de la fachada y paredes laterales del edificio evaluado se determinan empleando la termografía infrarroja (ver §4.1).

2.3 Temperatura equivalente sol-aire

Los elementos opacos de la envolvente edilicia capturan la energía proveniente del sol, calentando la superficie externa del edificio. La energía absorbida es parcialmente re-emitida en forma de radiación térmica al ambiente, aunque esta fracción de energía es significativamente menor que la energía total absorbida y es parcialmente compensada por la radiación térmica emitida

IRAM 11601:2001				
Componentes constructivos	Dirección del flujo de calor	h_i (m ² oC/W)	h_e (m ² oC/W)	
Pisos o techos	Hacia arriba	10	25.0	
Muros	Horizontal	7.7	25.0	
Pisos o techos	Hacia abajo	5.9	25.0	
ISO:2007 6946				
	Dirección del flujo de calor	h_i (m ² oC/W)	h_e (m ² oC/W)	
Pisos o techos	Hacia arriba	10.0	25	
Muros	Horizontal	7.7	25	
Pisos o techos	Hacia abajo	5.9	25	
NOM-020-ENER:2011-México				
	Dirección del flujo de calor	h_i (m ² oC/W)	h_e (m ² oC/W)	
Pisos o techos	Hacia arriba	9.4	13.0	
Muros	Horizontal	8.1	13.0	
Pisos o techos	Hacia abajo	6.6	13.0	
CIBSE – Reino Unido				
	Dirección del flujo de calor	h_i (m ² oC/W)	h_e (m ² oC/W)	
			Protegida	Expuesta
Cielo raso o techo (plano o inclinado), piso	Hacia arriba	10.0	17.0	50.0
Muro	Horizontal	7.7	17.0	50.0
Cielo raso o techo	Hacia abajo	5.9	17.0	50.0
ASHRAE – Estados Unidos de América				
Posición de la superficie	Dirección del flujo de calor	Superficie no Reflectiva	Superficie reflectiva	
		$\varepsilon = 0.90$	$\varepsilon = 0.20$	$\varepsilon = 0.05$
AIRE EN CALMA		h_i (m ² oC/W)		
Horizontal	Hacia arriba	9.3	5.2	4.3
Pendiente 45°	Hacia arriba	9.1	5.0	4.2
Vertical	Horizontal	8.3	4.2	3.4
Pendiente 45°	Hacia abajo	7.5	3.4	2.6
Horizontal	Hacia abajo	6.1	2.1	1.3
AIRE EN MOVIMIENTO (cualquier posición)		h_e (m ² oC/W)		
Invierno				
6.7 m/s	Cualquiera	34.0		
Verano				
3.4 m/s	Cualquiera	23.0		

Tabla 2.i: Valores del coeficiente convectivo exterior $h_e = R_{se}^{-1}$ e interior $h_i = R_{si}^{-1}$ considerados por diferentes normas, de acuerdo a la posición del cerramiento y sentido del flujo de calor.

por los edificios cercanos, por lo que usualmente no es considerada en los cálculos. El aumento del flujo de calor resultante de la irradiación solar puede incluirse en el cálculo de la temperatura superficial externa mediante la temperatura equivalente sol-aire $T_{sol-aire}$. (Kapsalis et al., 2014; Huelisz et al., 2014; Yan et al., 2015; Aoki y Mizutani, 2015). Esta es la temperatura del aire en el exterior para la cual, en ausencia de radiación, el ambiente externo entrega el mismo flujo de calor a la superficie del muro. Si la radiación emitida por la superficie de la envolvente es despreciable, resulta:

$$T_{sol-aire} = T_e + \frac{\alpha I_t}{h_e} \quad (2.1)$$

donde α es la absorptancia del material, h_e es el coeficiente de transferencia de calor ($m^2 \circ C W^{-1}$) (Tabla 2-i), I_t es la irradiancia solar total ($W m^{-2}$), y T_e es la temperatura del aire exterior ($^{\circ}C$). El valor de I_t depende de la localización geográfica del edificio, la posición del sol y la orientación de la fachada. Para calcular $T_{sol-aire}$, en primera aproximación, se toma $h_e = 25 m^2 \circ C W^{-1}$ de acuerdo con la norma IRAM 11601. Sin embargo, debe notarse que el efecto de I_t sobre el cálculo del flujo de calor no depende del valor adoptado de h_e .

2.4 Simulación térmica de edificios

La simulación numérica se usa para estimar el comportamiento térmico de las diferentes partes que conforman el edificio. En principio los objetivos perseguidos pueden ser varios, el más común consiste en estimar los consumos de energía y la producción asociada de CO_2 que conlleva, pero también analizar diferentes estrategias de control y comportamientos de los sistemas de climatización, prever la evolución de temperatura o humedad relativa en las diferentes zonas del edificio, etc. Los efectos de cada una de las contribuciones al cálculo (e.g. materiales de la envolvente, cantidad de habitaciones, fuentes internas, ganancia solar) varían con el tiempo y dependen de las condiciones ambientales, zona climática, tipo de edificio y sus características térmicas, y del uso y control que se establezca. Además hay que añadir la “inercia térmica”, es decir la propiedad de un material relacionada con la facilidad con que cambia su temperatura ante variaciones de la temperatura exterior. Como esta inercia nunca es despreciable, el uso de una aproximación estacionaria para establecer la demanda energética real del edificio (sobre todo en el caso de refrescamiento o cuando las condiciones ambientales oscilan sobre la temperatura de referencia de la instalación) puede conducir a resultados incorrectos. (ATECYR, 2008)

Existen cientos de modelos de simulación energética y/o programas disponibles para el análisis térmico de edificaciones. Sus usos son muy variados e incluyen el cálculo de cargas térmicas y emisión de CO_2 , la evaluación de las condiciones para el confort térmico y la proyección de costos. Las técnicas de optimización de los diseños bioclimáticos fueron clasificadas por Shi et al. (2016) en

tres grupos: (1) técnicas que integran programas de simulación energética con plataformas genéricas de optimización (e.g. ModelCenter, ModeFRONTIER, GenOpt) siendo el más utilizado MATLAB; (2) técnicas integradoras o programas de simulación de energía (e.g. EPlus+EA, MOBO, ENEROPT, GENE_ARCH) que realizan la optimización luego de vincularse con programas de simulación (e.g. ESP-r, DOE-2, IDA ICE, TRANSYS) siendo el más utilizado EnergyPlus; y (3) técnicas personalizadas o programas escritos en C++ Fortran, Visual Basic y Excel.

El desarrollo de programas complejos y específicos para una determinada tarea suele hacerse bajo el encargo de una empresa de software y normalmente su programación se mantiene en reserva con el objetivo de incrementar la productividad y, por tanto, la competitividad de la empresa. Salvo excepciones, raramente estos programas tienen fines públicos. Normalmente, los programas más sencillos se contratan con fines publicitarios y/o divulgativos de los productos de la empresa.

En Estados Unidos de América, programas como el DOE-2 surgieron como resultado de la inversión lenta pero constante de la administración americana desde 1970. El DOE-2 es un programa computacional desarrollado por el Departamento de Energía, empleado para diseñar edificios energéticamente eficientes. Calcula el requerimiento horario de energía y el costo de la demanda energética tanto de edificios comerciales como residenciales a partir de información sobre el clima local, los detalles de construcción, la operación, lista de tarifas de los servicios públicos, y equipos HVAC (del inglés *Heating, Ventilating and Air Conditioning*). De la misma época es el BLAST (*Building Loads Analysis and System Thermodynamics*) que fue encargado al Instituto Nacional de Normas y Tecnología. Este programa es un conjunto completo de sub-programas para predecir el consumo energético de edificios. Muchos programas empezaron programándose con lenguaje FORTRAN y evolucionaron hacia un lenguaje más similar a C++ o JAVA y están orientados a objetos. Otros programas como el TRNSYS (*Transient Simulation of Systems*) de la Universidad de Wisconsin-Madison tienen un ámbito de aplicación universitario y no estaban orientados inicialmente a la productividad o la industria, aunque recientemente se han creado aplicaciones para generar los modelos-D con mayor facilidad y productividad (SimCAD). Lo mejor de DOE-2 y BLAST conformó el programa *Energy-Plus* que se introducirá en el §6 ya que es el elegido para las simulaciones de nuestro caso de estudio.

Europa no dispone, por ahora, de una organización paneuropea que centralice y aúne el esfuerzo para el desarrollo de este tipo de software al modo americano. Lo que existe son diversos programas (con enfoques también diversos: comerciales, libres, código abierto, etc.) realizados de forma autónoma por algunos de los estados miembros. Algunos ejemplos son Dinamarca con el BSIM del *Instituto Danés para la investigación en edificios*, Reino Unido con el ESP-r (*Environmental Systems Performance - Research*) de la universidad de Strathclyde (Glasgow) con código abierto, y Suecia con el IDA-ICE que es un programa comercial con un código de simulación común y módulos con diversas aplicaciones (para el caso de edificios dicho módulo es el *ICE-Indoor Climate and*

Energy). El ESP-r es una herramienta sólida para la simulación del rendimiento de un edificio, equipado para modelar flujos de calor, aire, humedad, iluminación y energía eléctrica con resolución espacio-temporal específica.

Existen también empresas que producen programas comerciales para la introducción del modelo-D de forma cómoda en programas americanos de código abierto. Por ejemplo el IISIBAT del instituto francés para la edificación (CSTB) que utiliza como núcleo de cálculo el TRNSYS, o el *Design Builder* en Inglaterra que ayuda a generar el fichero idf que usa el *Energy-Plus* americano.

En Argentina, al concepto histórico clásico de arquitectura (que consiste en la utilidad, solidez y belleza) se sumaron los relacionados a la arquitectura urbanística (desde fines de la década de 1970) y, aunque con mayor dificultad, los condicionantes ambientales (a partir de los años '80) incorporando así pautas básicas que el diseño debe resolver e integrar. Consecuentemente, vienen desarrollándose tecnologías enfocadas al diseño eficiente de edificios que incluyen simulaciones térmicas (Pinedo et al., 2001). Desde el año 2000 a la fecha, se desarrollaron diversos programas de simulación energética en edificios como por ejemplo CEEMAKMP, CEEMACON y CEEMAQT (Gonzalo, 1998; Nota et al., 2003) que resuelven la ecuación de calor en estado estacionario, y ARQUITROP Y SETI (Chauvie, 2004) basados en el método de la admitancia. No obstante, las herramientas computacionales más utilizadas en Argentina son los programas SIMEDIF (Flores Larsen y Lesino, 2001) y SIMUSOL (Saravia y Alía, 2016), desarrollados íntegramente en el *Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional* (INENCO, Salta, Argentina). El primero de ellos permite realizar la simulación térmica de edificios con acondicionamiento natural a través de sistemas solares pasivos. El SIMUSOL es un programa que simula numéricamente el funcionamiento transitorio de distintos sistemas físicos ya sean térmicos, eléctricos, mecánicos, con aire húmedo o combinaciones de los mismos, y puede aplicarse al estudio de edificios y sistemas solares como calentadores de agua, cocinas, secadores, desalinizadores, equipos fotovoltaicos, y generadores térmicos de vapor y o electricidad. Debe tenerse presente que las predicciones de los programas más sencillos resultan satisfactorias cuando, en las comparaciones hora a hora, un 80% de las temperaturas resultantes difieren en no más de 2°C de los valores monitoreados y el 95% de las mismas difieren en menos de 3°C (Chauvie, 2004).

2.5 Ventilación natural

En el contexto de esta tesis, la ventilación natural se refiere al flujo de aire entre el interior y el exterior de un edificio. Este flujo ocurre a través de respiraderos, tradicionalmente ventanas, y aberturas controladas no necesariamente usadas para iluminar. Estos respiraderos suelen ser ventilas u orificios de formas definidas y su inclusión en el diseño de un edificio no presenta dificultades de por sí. El problema principal consiste en determinar la estructura y la intensidad del

flujo de aire dentro de un edificio constituido de múltiples espacios interconectados por aberturas, normalmente puertas. El desafío es comprender la física de la ventilación para proveer los mecanismos de control necesarios para:

- + asegurar la calidad del el aire requerida,
- + remover el exceso de calor y contaminantes, y
- + optimizar el costo de la ventilación y calefacción de los edificios.

Existen dos causales en la generación de la ventilación natural de un edificio: el viento y/o las diferencias de temperatura entre el interior y el exterior.

• ***Ventilación conducida por el viento***

El viento induce diferencias de presión entre los lados de un edificio y sobre el techo, dando lugar a la formación de un flujo de aire en el interior desde las aberturas a barlovento hacia las que están a sotavento. Estas diferencias de presión varían con la forma del edificio, la dirección del viento y la presencia de construcciones y vegetación circundantes.

Los primeros trabajos sobre ventilación natural se centraron en flujos conducidos por el viento estudiados en túneles de viento. Los modelos de edificios se colocan en una corriente de aire para medir las distribuciones de presión alrededor de los mismos para distintas orientaciones respecto del viento incidente. Tales distribuciones también pueden establecerse mediante el empleo de códigos de simulación. Las diferencias de presión se usan en el cálculo del flujo a través de las aberturas localizadas en diferentes sitios de la fachada. Los resultados se aplican directamente desde las pruebas en túneles de viento o simulaciones a edificios de escala completa, o bien se suministran valores empíricos dependiendo de la localización del inmueble. De esta información, la intensidad del flujo a través del edificio se relaciona con la velocidad del viento. En general, no se considera la estructura del flujo en el interior de la construcción.

• ***Ventilación conducida por diferencia de temperatura***

En este caso el flujo de aire es producido por la fuerza de flotación debida a diferencias de temperatura ΔT entre el exterior y el interior, y entre los ambientes internos. Además, la tendencia natural del aire caliente a ascender y acumularse en la parte superior de la habitación produce una estratificación estable. Por lo tanto, el modelado en túneles de viento no es apropiado y el análisis debe modificarse en forma sustancial (Marino y Thomas, 2006; Thomas et al., 2009; Thomas et al., 2011; Marino et al., 2011; Thomas et al., 2012). La localización y el tamaño de las aberturas son los factores que determinan la estratificación y las corrientes internas (Marino et al., 2008). Los ejemplos esquematizados en la Figura 2-2 ilustran la importancia de la ubicación de los respiraderos para determinar la configuración del flujo y la ventilación resultante:

a) Si el aire en la habitación es más cálido que el del exterior, entonces la instalación de una simple abertura en la parte superior de la habitación permite el intercambio. El aire frío entrante

desciende como una pluma turbulenta tendiendo a mezclarse con el del interior de la habitación. Este tipo de ventilación, conocido como *ventilación por mezclado*, se caracteriza por una distribución uniforme de la temperatura interior aún si hubiese fuentes de calor (F).

b) Si la abertura se encuentra en la parte inferior de la habitación, hay intercambio hasta que el aire frío entrante ocupa una capa cuya altura llegue hasta el borde superior de la abertura.

Ninguno de estos casos constituye una forma eficiente de ventilar un ambiente.

c) Si se abren dos respiraderos, el aire cálido fluye a través del superior mientras el aire más frío ingresa por el inferior. Una interface estable se forma entre las capas de aire cálido y frío. Esta forma de ventilación se conoce como *ventilación por desplazamiento* (o efecto *chimenea*) y se caracteriza por producir importantes variaciones de temperatura dentro de la habitación. Para la misma ΔT y área de respiradero, la ventilación por desplazamiento es mayor que en (a) y (b).

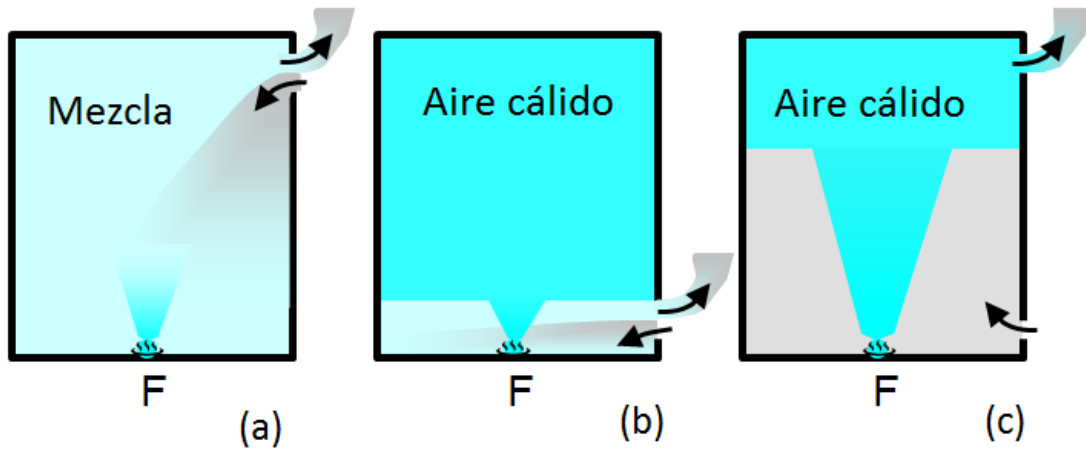


Figura 2-2: Ventilación (a) por mezclado, (b) por una abertura inferior y (c) por desplazamiento en presencia de una fuente de calor F.

• El nivel de presión neutral

La densidad del aire exterior ρ_e es constante y la del que ocupa el interior es $\rho_i(z)$. En ausencia de movimiento y con estratificación continua, la presión p es hidrostática (es decir, $dp/dz = -\rho g$ con z : coordenada vertical y g : aceleración de la gravedad). Sea Z la altura de la habitación o del edificio evaluado, y $0 < z_{\text{neutral}} < Z$ el nivel al cual la presión en el interior iguala la presión externa a aquella altura (Marino et al., 2008). A un nivel $z \neq z_{\text{neutral}}$, la diferencia de presión Δp entre el exterior y el interior depende de la altura desde z_{neutral} y de la diferencia entre las densidades del aire interno ρ_i y externo ρ_e :

$$\Delta P = (\rho_e - \rho_i)g(z - z_{\text{neutral}}) = \rho_i g(z - z_{\text{neutral}}) \frac{T_i - T_e}{T_e}, \quad (2.2)$$

La mayor presión interna ($\Delta p > 0$) al nivel de la abertura más alta induce un flujo hacia afuera, mientras que la menor presión interna ($\Delta p < 0$) al nivel de la abertura más baja induce un flujo hacia

adentro. Así el nivel neutral define la altura que separa las aberturas más alta y más baja: los flujos de aire hacia fuera a través de aberturas situadas sobre el nivel neutral (aberturas superiores) y hacia adentro a través de aberturas situadas por debajo del nivel neutral (aberturas inferiores). Esto tiene importantes implicaciones en el diseño de los sistemas de ventilación para evacuar humo desde un incendio, por ejemplo, ya que las salidas superiores deben encontrarse por encima del nivel neutral.

• **Forma y orientación del edificio para inducir flujos de flotación**

La elección de la ubicación y orientación de una vivienda y la mayoría de las decisiones tomadas en las etapas de su diseño tienen un importante efecto sobre el consumo energético necesario para su funcionamiento. Este es el caso para prever el óptimo aprovechamiento de la ventilación natural para minimizar el enfriamiento o maximizar el aprovechamiento de la energía solar para calefacción. Combinando la entrada de luz natural con la ventilación natural, es posible proveer interiores confortables durante períodos calurosos minimizando o eliminando la necesidad de refrigeración mecánica y logrando la renovación adecuada del aire sin enfriar excesivamente los ambientes en invierno. Los beneficios directos e indirectos que implica el diseño de edificios en cuanto a su eficaz funcionamiento térmico, dependen de la forma, orientación y propósito de su uso. (Marino et al., 2008; Thomas et al., 2007a, 2007b)

Como resultado, hay varias formas de aumentar el flujo conducido por flotación: aumentando la diferencia de altura entre las aberturas, incrementado el tamaño de estas y calentando el aire dentro del edificio. Además, pueden colocarse aberturas altas en una zona de la vivienda para disminuir la presión por acción del viento (como en el techo de la Figura 2-2c). En tal caso el viento incrementará la ventilación natural debida a las ΔT .

• **Incorporación de atrios y/o chimeneas al diseño**

Las grandes áreas de vidrio asociadas con los atrios tienen ganancias solares altas en verano y grandes pérdidas de calor en invierno, y presentan problemas con el movimiento de aire y la distribución de temperatura en los distintos niveles. Sin embargo, mediante un adecuado diseño, el aire caliente ascendente en un atrio puede usarse, como en el montículo de las termitas, para operar la ventilación debida a la ΔT a través de todo el edificio. Por lo tanto, se recomienda el uso de lucarnas, atrios o chimeneas altas para aumentar las Δp debidas a la flotación. Estos se pueden colocar en el centro del edificio para crear flujos cruzados desde los laterales del mismo, o en un extremo para crear flujos cruzados desde un lateral al otro (Figura 2-3). Además, se debe analizar el flujo de aire a distintos niveles de altura dentro del edificio para asegurar la adecuada ventilación bajo diferentes condiciones de viento. Los ambientes interiores deben distribuirse para evitar los bolsones de aire que no componen el flujo. También deben observarse las dimensiones de las aberturas destinadas a la ventilación disponiendo las más pequeñas en la planta baja y las más

grandes en la planta alta.

Dascalaki y Santamouris (1996) y Linden (1999) indicaron que un diseño arquitectónico optimizado conducente al máximo aprovechamiento de la *ventilación conducida por diferencias de temperatura*, un interior estratificado y una adecuada administración (de la localización y uso) de las aberturas permiten lograr un buen confort térmico para los ocupantes sin recurrir al empleo de equipos mecánicos (aire acondicionado y/o ventiladores). No obstante, el aprovechamiento de la eventual *ventilación cruzada* puede ayudar a la generada por diferencias de temperatura, de igual manera que lo harían los sistemas híbridos con ventilación parcialmente forzada mecánicamente y combinaciones de ventilación por viento y flotación para algunos días o eventos especiales.

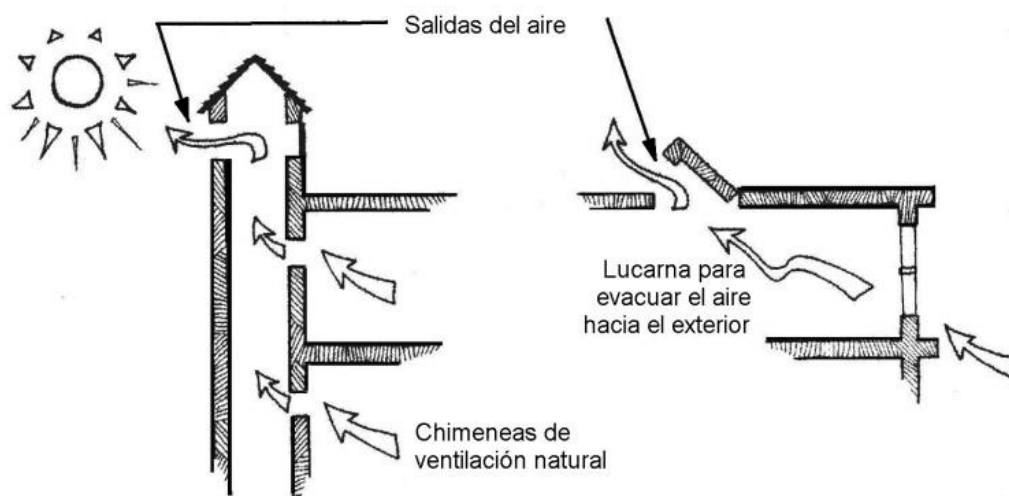


Figura 2-3: La incorporación de chimeneas y lucarnas en un edificio aumenta la Δp debida a las fuerzas de flotación.

La ventilación conducida por efecto chimenea en un ambiente estratificado es más efectiva en espacios altos y con diseño de atrios o patios interiores ya que las diferencias de presión debidas a la flotación son directamente proporcionales a las diferencias de altura y de temperatura entre al aire entrante y el saliente como indica la Ec. (2.2) (Thomas et al., 2007c). La ventilación natural debe estudiarse en el edificio completo para asegurar la trayectoria del flujo de aire, a través y hacia fuera de los ambientes. En cambio, el análisis habitación-por-habitación resulta útil cuando se desea analizar el flujo de aire en ambientes cerrados o poco ventilados.

2.5 Confort térmico (o Comodidad higro-térmica)

Para llevar a cabo la vida en general, el cuerpo humano extrae energía de los alimentos gracias al metabolismo y genera calor residual. Para mantener su interior a 36.5-37°C, intercambia calor con el ambiente por medio de los mecanismos de conducción, convección, radiación y evaporación. A

medida que la temperatura ambiente se acerca a la corporal, el cuerpo ya no puede transmitir calor por falta de un gradiente térmico y la evaporación queda como única forma de enfriamiento. El confort térmico es la manifestación subjetiva de conformidad o satisfacción con el ambiente térmico existente; es decir, es la sensación respecto al entorno percibida por el ocupante de un espacio cerrado cuando las condiciones de temperatura, humedad y movimiento del aire son favorables a la actividad que desarrolla. Para alcanzar la sensación de confort, el balance global de pérdidas y ganancias de calor del cuerpo debe ser nulo, conservando así la temperatura normal. En consecuencia, uno de los objetivos principales del diseño de una edificación es proveer ambientes interiores térmicamente confortables con un mínimo de equipamiento mecánico (Thomas y Marino, 2008). Debe observarse que la humedad del aire es tan importante para el comportamiento térmico de un edificio como la temperatura, motivo por el cual debe hablarse más bien del *confort higro-térmico* (CHT).

El CHT depende de varios parámetros globales externos (e.g. temperatura y velocidad del aire, humedad relativa, temperatura media radiante), parámetros específicos internos (e.g. actividad física desarrollada, cantidad de ropa, metabolismo de cada individuo) y factores ambientales (e.g. clima exterior, estación del año, hora del día, asoleamiento, iluminación). Por lo tanto, los rangos de las variables que definen el CHT establecidos por las normas técnicas suelen diferir bastante. La mayoría de los criterios fueron desarrollados para el caso de invierno, con temperaturas exteriores bajas y calefacción ambiental, y para ambientes de estadia permanente. La Figura 2-4 presenta las condiciones del CHT determinadas para la ciudad de Tandil durante el año 2016. A continuación se presentan algunos de esos intervalos y condiciones ambientales según Blender (2015).

➤ ***Temperatura del aire ambiente***

Esta temperatura determina cuánto calor el cuerpo pierde hacia el aire principalmente por convección. El rango de confort se extiende desde 18-20°C en invierno a 25-26°C en verano aunque también es importante considerar el gradiente térmico vertical (entre la cabeza y los pies no debería haber una diferencia de temperatura mayor a 3°C). No obstante, la sensación de insatisfacción puede compensarse, dentro ciertos rangos, mediante ajustes de uno o más de los otros factores ambientales.

➤ ***Temperatura radiante media***

Representa el calor emitido en forma de radiación por los elementos del entorno y se compone de las temperaturas superficiales ponderadas de todos los cerramientos. Es deseable que el valor no difiera mucho de la temperatura del aire.

➤ ***Temperatura operativa***

Es el valor medio entre la temperatura del aire y la temperatura radiante media, y representa la temperatura “sentida” por la persona en un ambiente interior. Los valores recomendados son 20-

22°C para el invierno y 25-27°C para el verano. En invierno se aceptan valores más bajos para los dormitorios, las cocinas y los pasillos, y se exige valores más altos para los cuartos de baño y los dormitorios de personas enfermas.

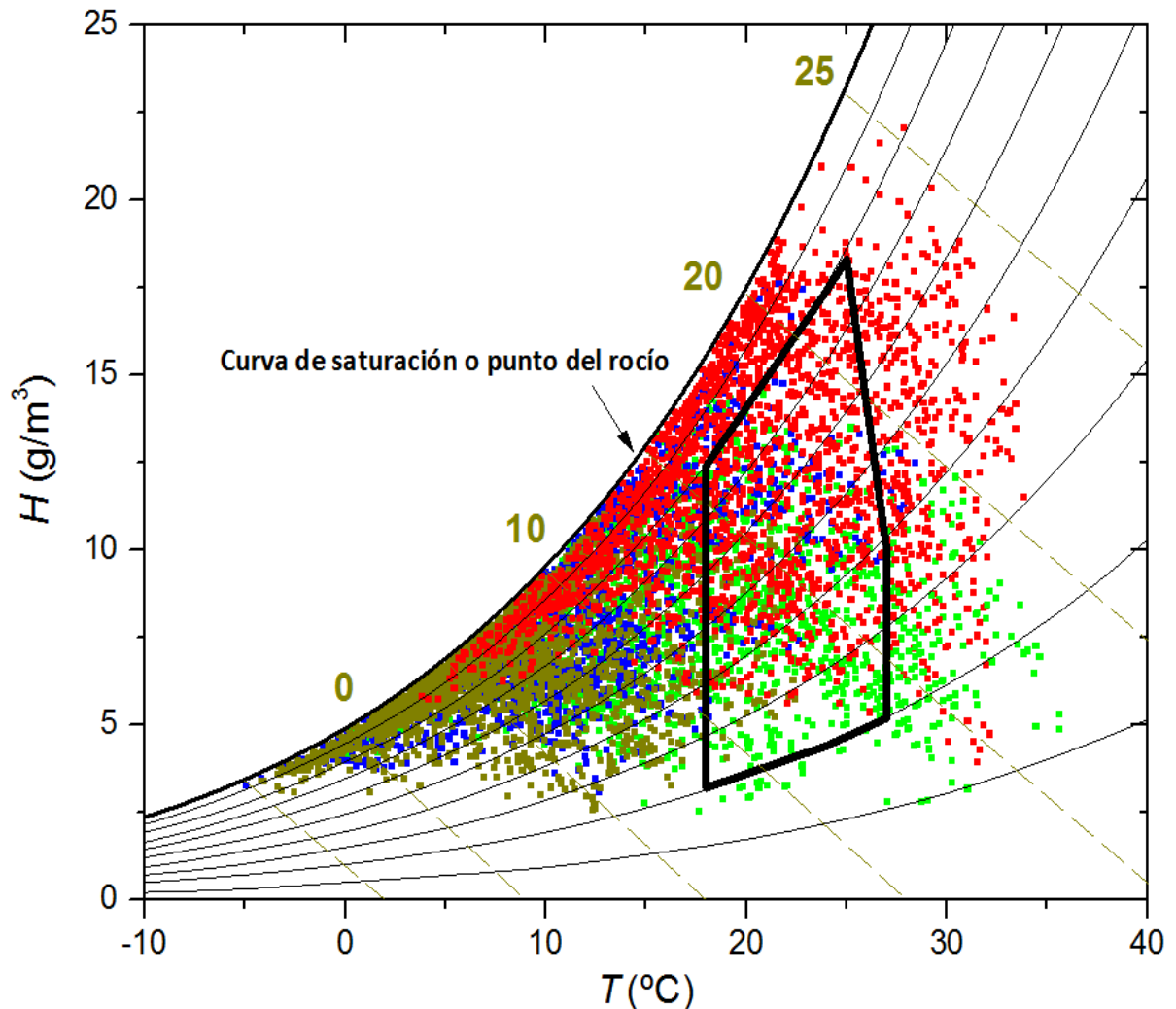


Figura 2-4: Confort térmico en función de la temperatura (de bulbo seco) y la humedad absoluta del aire para verano (símbolos rojos), primavera (verde), otoño (marrón) e invierno (azul) en Tandil durante 2016. Las líneas continuas delgadas representan los valores de la humedad relativa entre 10 y 90% mientras las líneas de trazos corresponden a los valores indicados de la temperatura de bulbo húmedo. La región recuadrada corresponde a las condiciones de CHT para Tandil (Givoni, 1969).

➤ **Velocidad del aire**

El movimiento del aire influye fuertemente en la pérdida del calor del cuerpo por convección y evaporación. Las velocidades de aire inferiores a 0.1 m/s por lo general no se perciben. El rango recomendado es 0.1-0.2 m/s. Cuando los movimientos de aire enfrían el cuerpo humano más allá de lo deseado se habla de “corrientes de aire”. No obstante a temperaturas ambientales altas, las brisas de hasta 1.0 m/s pueden sentirse agradables dependiendo del nivel de actividad y la temperatura. Sobre los 37°C, el aire en movimiento calienta la piel por convección y a la vez la enfría por evaporación resultando que, cuanto más alta es la temperatura, menor es el efecto refrescante.

➤ ***Humedad relativa del aire***

La evaporación de humedad de la piel es principalmente una función de la humedad del aire. El aire seco absorbe la humedad y enfría el cuerpo en forma efectiva. Favorable para la salud humana es una humedad relativa del aire entre los 30-40% y 60-70%.

➤ ***Habitabilidad***

Una condición importante es que los recintos habitables no tengan moho. Para garantizarlo, la temperatura superficial interior de cualquier parte de la envolvente, excepto las ventanas, no debe ser inferior a la del punto de rocío para prevenir la condensación superficial. A su vez, la temperatura de rocío depende de la temperatura y humedad relativa del aire.

➤ ***Eficiencia energética***

Esta es influenciada directamente por la humedad del aire ya que el aire húmedo es más difícil de calentar que el aire seco, y los materiales de construcción húmedos tienen un efecto aislante drásticamente reducido. Por lo tanto, se recomienda limitar la humedad del aire en estación fría a un máximo de 50-60%.



3. METODOLOGÍA

En este capítulo se especifican las características del edificio tomado como caso de estudio y la ubicación geográfica de su emplazamiento. También se describen las mediciones de campo realizadas que incluyen el monitoreo higo-térmico interno del edificio y el empleo de una cámara termográfica para la obtención de las temperaturas superficiales. En el próximo capítulo se muestra cómo esta información se emplea en el análisis inverso y cómo sirve para mejorar los resultados del análisis directo. También se presentan dos métodos matemáticos: el método de la admitancia que posibilita introducir los efectos de las variaciones diarias de la temperatura externa sobre el flujo de calor transmitido a través de las paredes de la envolvente, y el modelo de regresión lineal múltiple que permite vincular matemáticamente varias variables independientes con las mediciones.

3.1 Descripción del edificio evaluado, ubicación geográfica y clima

La ciudad de Tandil ($37^{\circ}19'S$, $59^{\circ}08'O$) ofrece una interesante variedad de edificaciones para evaluar estándares de eficiencia energética. Es cabecera del partido homónimo, se localiza en el centro-este de la provincia de Buenos Aires a 360 km de la ciudad de Buenos Aires y a 160 km de la costa atlántica. Está emplazada en el sistema serrano de Tandilia y se encuentra a 188 m sobre el nivel del mar, en la región geográfica de la pampa húmeda. La región tiene clima templado y húmedo con veranos suaves (subhúmedo serrano en razón de la geomorfología circundante) y amplitudes térmicas intermedias (alrededor de $15^{\circ}C$) a lo largo del año (Figura 3-1). Durante la noche y las madrugadas de invierno suelen producirse heladas y bancos de niebla. Debido a la alta nubosidad registrada, la región no cuenta con un recurso solar significativo en invierno. La ciudad es afectada por diversos fenómenos meteorológicos durante todo el año como el pampero, la sudestada y el arribo de frecuentes frentes fríos desde el sur y cálidos desde el norte, que pueden dar origen a cambios importantes y rápidos de las condiciones meteorológicas con variaciones apreciables de los valores medios de temperatura y humedad del aire que se mantienen durante varios días. Así, es frecuente que el clima estival alterne días agobiantes de calor con otros de mañanas frías, y también es usual la existencia de varios días cálidos consecutivos en invierno.

Los valores típicos para Tandil según la norma IRAM 11603 (2011) y Czajkowski (2015), correspondiente a la zona IV(c) de clima templado frío de transición (Czajkowski y Rosenfeld, 1992), se resumen en la Tabla 3.i. Los requerimientos locales de aislación térmica de la norma IRAM recomendados por Czajkowski y Gómez (1994) implican que el diseño de las edificaciones contemple muy buena aislación en toda la envolvente, doble aislación en techos respecto de aquella en los muros, aprovechamiento de la inercia térmica para disminuir el efecto de la amplitud térmica, el control de infiltraciones, la implementación de la ventilación cruzada durante el verano y una

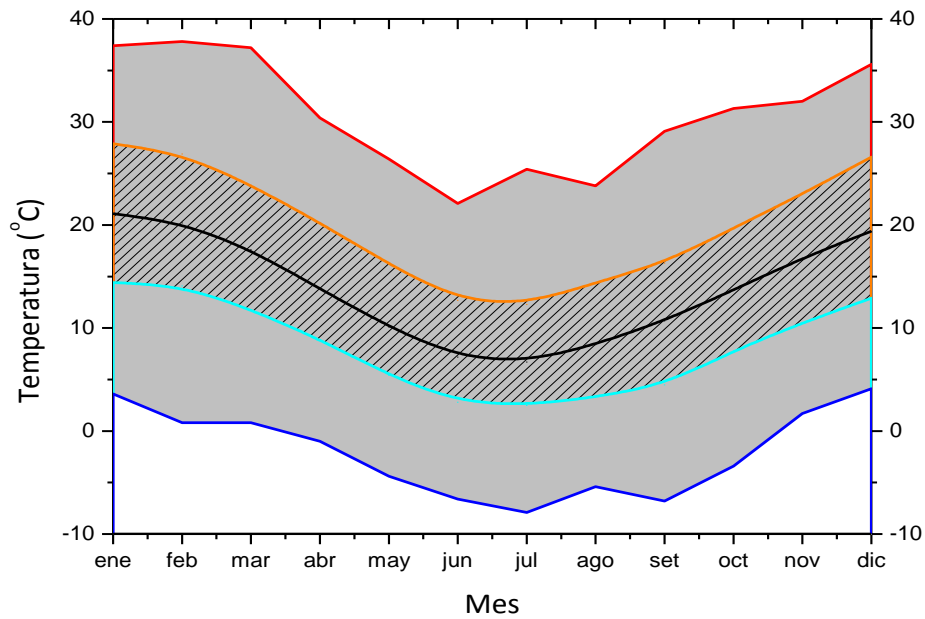


Figura 3-1: Temperaturas en la ciudad de Tandil reportadas por el Servicio Meteorológico Nacional. Las líneas unen los valores mensuales medios (negra), máximos promedio (naranja), mínimos promedio (celeste), y los máximos y mínimos absolutos registrados (roja y azul, respectivamente).

relación superficie vidriada –superficie opaca que supere el 15%.

El edificio tomado como objeto de estudio y que fue construido según los estándares recomendados para el centro de la provincia de Buenos Aires (Argentina) es aquel donde funciona la Biblioteca Central de la Universidad del Centro de la Provincia de Buenos Aires (Figuras 3-2 y 3-3). Se encuentra ubicado en una zona residencial de baja densidad poblacional a 6.8 km del centro urbano. Tiene dos plantas de 1745 m² cada una, un atrio central rematado por una lucarna vidriada cerrada de 25 m² y una fachada frontal dotada mayormente de superficies vidriadas. Los cerramientos de doble vidriado hermético (DVH) con cámara de aire de 0.006 m de espesor abarcan un área de 310 m², mientras que las puertas y los paneles fijos vidriados con cámara de aire de 0.012 m ocupan 37 m². El resto de la fachada se compone de muros de 0.30 m de espesor compuestos de revoque fino y grueso, ladrillo hueco, azotado hidrófugo, plancha de poliestireno expandido (PEE) y ladrillo visto, cubriendo un área total de 415 m². De acuerdo al valor $U = 0.72 \text{ W/m}^2\text{°C}$ de la envolvente edilicia total obtenido con el procedimiento descrito en la norma IRAM 11601 sin considerar las resistencias superficiales, la categoría del edificio es cercana al nivel A de confort higrotérmico y también cumpliría con la norma IRAM 11605 relacionada con el ahorro energético por refrigeración en verano. La relación vidrio/opaco es del 50% distribuida de la siguiente forma: 30% del área vidriada se ubica al norte (N), 25% al este (E), 25% al oeste (O) y 20% al sur (S). La misma se encuentra dentro del rango implicado en un modelo de distribución de los vidriados por orientación según criterio bioclimático.

Símbolo	Nombre	Verano (Ene-Feb)	Invierno (Jun-Jul)
TMXA	Temperatura máxima absoluta (°C)	37.2	23.8
TMAX	Temperatura máxima media (°C)	26.9	12.8
TMED	Temperatura media (°C)	20.0	7.5
THUM	Temperatura húmeda (°C)	16.5	6.2
TMIN	Temperatura mínima media (°C)	13.3	3.1
TMNA	Temperatura mínima absoluta (°C)	2.2	-7.1
TROC	Temperatura de rocío (°C)	13.9	4.6
TVAP	Presión parcial del vapor de agua (hPa)	16.4	8.8
TDMN	Temperatura de diseño mínima (°C)	8.8	-1.4
TDMX	Temperatura de diseño máxima (°C)	30.4	16.3
HR	Humedad relativa (%)	71.0	83.5
VV	Velocidad media del viento (km/h)	14.0	14.0
PREP	Precipitación media (mm)	102.5	55.5
NUB	Nubosidad	3.6	4.6
CLA	Días cielo claro	9.5	6
CUB	Días con cielo cubierto	5.5	11
PRE	Días con precipitación	7.5	6.5
GRA	Días con granizo	0.05	0
NEV	Días con nevadas	0	0.1
NIE	Días de niebla	5	8
HEL	Días con heladas	0	8
TOR	Días de tormenta	4.5	1.5
HEF	Heliofanía efectiva	8.3	4.1
HRE	Heliofanía relativa	59	41
PRAT	Presión atmosférica (hPa)	991.1	995.1
GDC18	Grados-día de calefacción base 18°C	0	307.5
GDC20	Grados-día de calefacción base 20°C	5	368.5
GDC22	Grados-día de calefacción base 22°C	55.5	429.5

Tabla 3.i: Valores característicos de parámetros meteorológicos en Tandil según norma IRAM 11603.

Las cuatro fachadas de la envolvente se componen de 7 componentes constructivos que se repiten y combinan para dar lugar a los 44 sectores que constituyen la envolvente. Los componentes constructivos consisten en: dos tipos de superficies de doble vidriado hermético de 0.024 m y 0.028 m de espesor, mampostería de muros dobles, techo compuesto, piso, lucarna en el centro del techo que permite el ingreso de la luz solar, y sector de calderas con puertas metálicas. La Figura 3-4 muestra el plano de la planta baja (PB), similar al de planta alta (PA). En ella se indica la posición de los sectores, mientras fotografías de algunos de ellos se muestran en la Figura 3-5. Si bien estos sectores se repiten en la envolvente (como por ejemplo, sectores 7 y 18), su identificación diferenciada se debe a la distinta cantidad de radiación solar que reciben por su orientación



(a)



(b)



(c)

Figura 3-2: (a) Vista frontal, (b) Vista al noroeste, y (c) sala de lectura (atrio) del edificio evaluado.



(a)



(b)

Figura 3-3: (a) Fachada orientada al noreste, y (b) vista posterior del edificio evaluado.

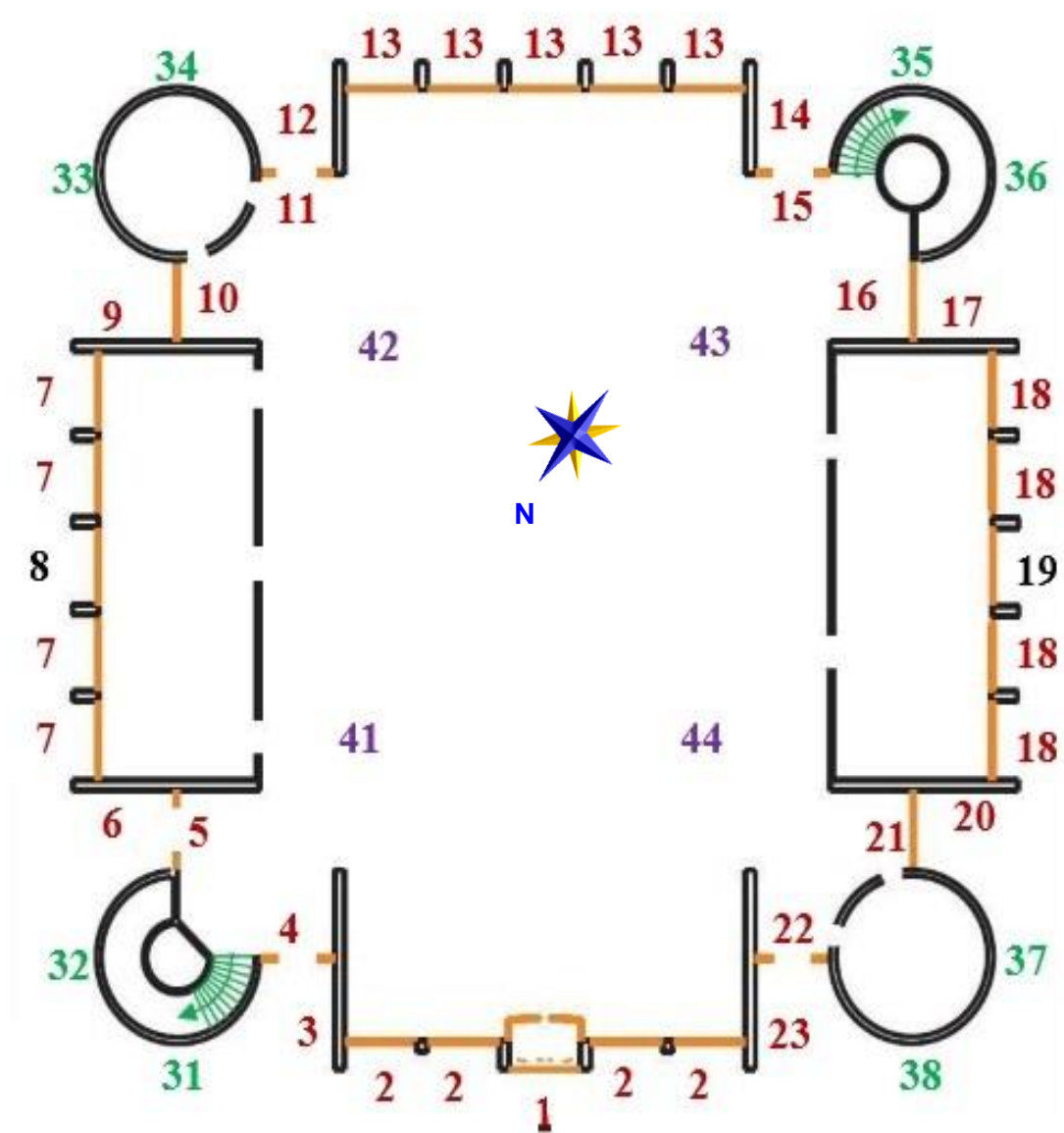


Figura 3-4: Esquema de planta baja con la ubicación de los 44 sectores constructivos en las diferentes fachadas y techo. Vidrios y paredes verticales (rojo), superficies verticales cilíndricas (verde), terraza (violeta) y calderas (negro).



(a) Sector 1PB (entrada principal)



(b) Sector 2PB



(c) Sector 7 (PB y PA)



(d) Sector 8 (PA y PB)

Figura 3-5: Algunos sectores constructivos que conforman las fachadas del edificio indicados en la Figura 3-3.

geográfica. Las Tablas 3.ii y 3.iii presentan las propiedades térmicas de los materiales utilizados en la envolvente edilicia. En particular, la norma IRAM 11601 establece los procedimientos para el cálculo de las propiedades térmicas de los materiales de construcción en régimen estacionario. Se obtiene así el coeficiente de transmitancia térmica $U = R_T^{-1}$, con R_T : resistencia térmica total para cada componente constructivo indicado en la Tabla 3.ii, que incluye las resistencias térmicas superficiales externa R_{se} e interna R_{si} (Tabla 2.i). Estos parámetros dependen de la dirección del flujo de calor: horizontal para los muros, ascendente en invierno y descendente en verano para los techos. La Tabla 3.iv indica el área total cubierta por algunos componentes constructivos.

Componente	Material	Espesor e (m)	Calor específico C_p (J/Kg°C)	Densidad ρ (kg/m ³)	Conductividad k (W/m°C)	Resistencia $R = e/k$ (m ² °C/W)	Transmitancia $U = R_T^{-1}$ (W/m ² °C)
Vidrios DVH	Cámara de aire	0.006	1000	1.2		0.142	3.205
	Vidrio	0.018	750	2500			
	Total considerando las resistencias superficiales (R_T):					0.312	
Vidrios DVH	Cámara de aire	0.012	1000	1.2		0.187	2.801
	Vidrio	0.018	750	2500			
	Total considerando las resistencias superficiales (R_T):					0.357	
Muros	Ladrillo macizo	0.120	1000	1600	0.810	0.148	0.572
	PEE	0.037	1700	17	0.037	1	
	Ladrillo hueco	0.120	920	800	0.300	0.400	
	Revoque grueso	0.020	1050	1400	0.930	0.022	
	Revoque fino	0.005	1000	1400	0.700	0.007	
	Total:					1.577	
	Total considerando las resistencias superficiales (R_T):					1.747	

Tabla 3.ii: Propiedades térmicas de las componentes verticales de la envolvente. En estos casos $R_{sj} = 0.13 \text{ m}^2 \text{ °C/W}$ y $R_{se} = 0.04 \text{ m}^2 \text{ °C/W}$ según norma IRAM 11601.

Componente	Material	Espesor e (m)	Conductividad k (W/m°C)	Resistencia e/k (m ² °C/W)	Transmitancia U (W/m ² °C)
Techo	Hormigón	0.100	1.603	0.062	0.504 (invierno) 0.488 (verano)
	Carpeta	0.020	1.3	0.015	
	Geotextil	0.050	0.7	0.071	
	Contrapiso	0.026	0.09	0.283	
	PEE	0.051	0.037	1.373	
	Yeso	0.01	0.37	0.027	
	Total:			1.843	
	R_T en invierno :			1.983	
	R_T en verano:			2.053	
Lucarna	Vidrio Blindado: R_T en invierno			0.154	6.49 (invierno)
	R_T en verano			0.224	4.46 (verano)
Piso	Baldosa	0.020	0.700	0.029	1.701 (invierno) 1.618 (verano)
	Contrapiso	0.130	0.310	0.419	
	Total			0.448	
	Total con R_s en invierno:			0.588	
	Total con R_s en verano:			0.618	

Tabla 3.iii: Propiedades térmicas de las componentes horizontales de la envolvente. Para estos casos $R_{sj} = 0.10$ y $R_{se} = 0.04 \text{ (m}^2 \text{ °C/W)}$ en invierno y $R_{sj} = 0.17$ y $R_{se} = 0.04 \text{ (m}^2 \text{ °C/W)}$ en verano.

DVH en ventanas			DVH en puertas de emergencia		
Orientación	Componente	Área (m ²)	Orientación	Componente	Área (m ²)
NO	2	102.96	NO	4	9.36
NE	7	43.92		22	9.36
SE	13	70.56	SE	11	9.36
SO	18	83.52		15	9.36
			NE	5	9.36
	Total	300.96		Total	46.8

Paredes verticales			Paredes cilíndricas		
Orientación	Componente	Área (m ²)	Orientación	Componente	Área (m ²)
NE	3	18.72	O	31; 36	15.2 c/u Total 121.3
	12	18.72	E	32;35	
	7	40.32	N	33;38	
SO	14	18.72	S	34;37	
	23	18.72			
	18	28.8	Techo		
SE	9	18.72		Componente	Área (m²)
	17	18.72		41,42,43,44	1360
	13	41.76	Lucarna		
NO	6	18.72			Área (m²)
	20	18.72			25
	Total	260.64			

Tabla 3.iv. Orientación y área de algunos componentes constructivos del edificio evaluado.

3.2 Medición en campo

3.2.1 Monitoreo térmico del edificio

Se instalaron seis registradores *HOBO* U12 en el atrio del edificio a 1 m (PB), 4.6 m (1 m por encima del piso de PA) y 6.6 m (justo debajo de la lucarna) desde el piso, en las proximidades de las paredes E y O, dos en cada nivel sobre un plano vertical diagonal N-S como ilustra la Figura 3-6. Estos sensores miden la temperatura interna T_i (°C) en el rango -20°C–70°C cada 10 min con una precisión de $\pm 0.35^\circ\text{C}$ y resolución de 0.03°C a 25°C , humedad relativa (*HR*) entre 5% y 95% con una precisión de $\pm 2.5\%$ y resolución de 0.05% , e iluminancia (E_v) entre 1 y 30000 lx. Cada *HOBO* tiene una capacidad de almacenamiento en su memoria interna de hasta 43000 mediciones. Como los sensores ubicados a un mismo nivel de altura registraron valores de temperatura muy cercanos, estos se promedian para trabajar con un único valor de T_i por nivel, disminuyendo la incerteza de las mediciones.

Los registros de la temperatura T_e (°C) del exterior, dirección y velocidad del viento u (m/s), intensidad de radiación solar medida I_{med} (Wm^{-2}), humedad relativa, índice de nubosidad, presión atmosférica, visibilidad y precipitación, entre otros parámetros, son proporcionados cada 15 min por la estación meteorológica del *Servicio Meteorológico Nacional* localizada a 15 km del Campus pero en terrenos con similares características. Otra estación meteorológica *Sinometer* WS1081 del *Instituto de Hidrología de Llanuras* ubicada a 200 m de la Biblioteca Central ofrece información

complementaria medida cada 15 min de temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, precipitación, dirección y velocidad del viento, reflectividad en la banda roja e infrarroja (IR), NDVI (de su sigla en inglés *Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada*), y humedad del suelo a 0.05 m. Esta estación cuenta con el radiómetro CNR2 *Campbell Scientific* diseñado para determinar la radiación horizontal neta (I_{med}) distinguiendo la radiación IR de onda larga y la radiación de onda corta.

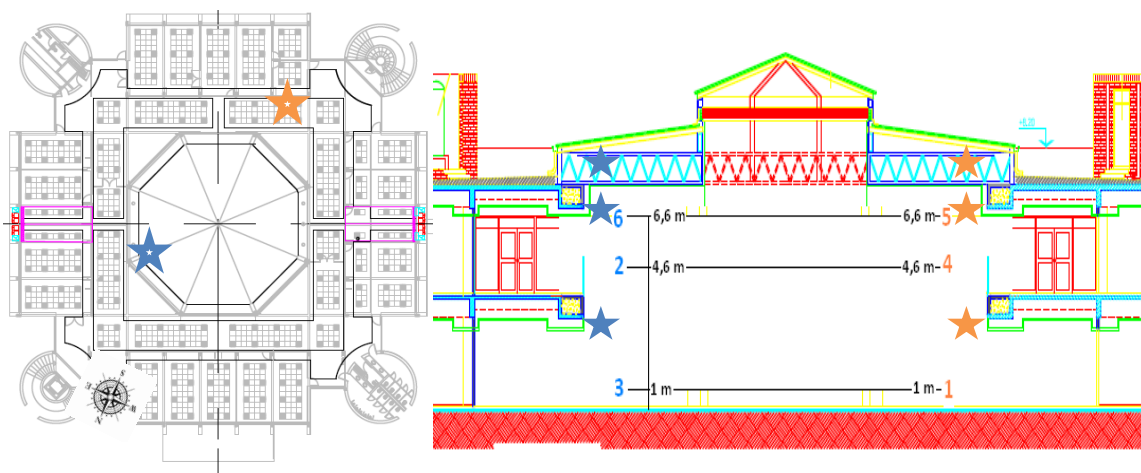


Figura 3-6: Posiciones de los sensores HOBO (★) en la vista superior del plano simplificado (izquierda) y en un corte del edificio (derecha).

3.2.2 Termografía infrarroja

La técnica de termografía infrarroja (TTIR) permite medir temperaturas a distancia con exactitud y sin necesidad de contacto físico con el objeto a estudiar, mediante la captación de la radiación IR del espectro electromagnético utilizando cámaras termográficas o de termovisión. Conociendo datos del entorno (e.g. humedad y temperatura del aire, distancia al objeto termografiado, temperatura reflejada, radiación incidente) y la emisividad de la superficie termografiada puede convertirse la energía radiada detectada por la cámara termográfica en valores de temperaturas. Cada pixel de la imagen corresponde a un valor de radiación y de temperatura. Esa imagen se define como *radiométrica*. La Figura 3-7 muestra la fotografía de una fachada del edificio evaluado y su correspondiente imagen termografiada.

La facilidad y rapidez de las mediciones realizadas con cámaras termográficas en áreas inaccesibles y sin contacto con las superficies hace de la termografía una técnica muy requerida en campos como el de la construcción e inspecciones de instalaciones eléctricas (Avdelidis y Moropoulou, 2004; Rahman Al-Kassir et al., 2005; Sandrolini y Franzoni, 2006; Lindquist y Bertling, 2008; Balaras y Argirou, 2002), en ambientes industriales (Chrysochoos et al. 2008; McMullan, 1990) y en objetos de difícil acceso (Clark, 2003), aunque también en medicina y veterinaria (Keyserling et al., 2000; McCafferty, 2007). Acompañando las técnicas tradicionales de monitoreo de edificios, se

constituye en una valiosa herramienta para detectar defectos en la envolvente, puentes térmicos, infiltraciones o fugas de aire y manchas de humedad (Sanglier, 2003; Martín et al., 2004; Rosina y Spodek, 2009). Como complemento de las auditorías térmico-energéticas, es particularmente



Figura 3-7: Foto parcial de la fachada orientada al NE del edificio evaluado (arriba) y correspondiente termografía (abajo).

importante para evaluar el confort térmico a través de la medición de temperaturas superficiales de muros, pisos y techos. Aprovechando estas propiedades, Flores Larsen y Hongn (2012) presentaron aplicaciones cualitativas de la termografía IR nocturna en construcciones de la ciudad de Salta durante el invierno, describieron las posibles fuentes de error más comunes de los termogramas y analizaron su efecto sobre las medidas cuantitativas. También Alías et al. (2013) reportaron resultados de la aplicación cualitativa de la termografía como complemento de una evaluación de desempeño higrotérmico-energético realizada en el edificio de la FAU–UNNE (Campus UNNE de la ciudad de Resistencia, Chaco) durante períodos de verano e invierno, especialmente en la detección de puntos, áreas y cuestiones críticas (puentes térmicos, filtraciones de humedad, incidencia del asoleamiento y de los colores de las distintas superficies de la envolvente constructiva, entre otros).

No obstante, si bien se han registrado notables avances en la construcción de las cámaras termográficas y en el análisis de las imágenes obtenidas, los estudios presentan limitaciones como, por ejemplo, las provocadas por la distorsión de las lentes termográficas que dificultan la obtención de registros de temperatura georeferenciados o mapear las termografías con isotermas de los objetos analizados. Además, la necesidad de conocer con exactitud la emisividad de la superficie analizada y de contar con un adecuado control de las condiciones de trabajo (temperatura y humedad del aire, viento, evitando el sol directo, sin lluvia reciente, etc.) pueden conducir a lograr medidas imprecisas de temperatura. Los factores críticos son la emisividad de la superficie, la transmisión atmosférica, la temperatura y humedad ambiente, el viento, la reflexión o absorción de fuentes de calor naturales y artificiales que rodean la superficie analizada, además de una adecuada calibración de la cámara antes de tomar las imágenes. Menos se ha avanzado en el uso de cámaras termográficas para realizar estudios cuantitativos debido al especial cuidado requerido en la elección de los factores determinantes para obtener las distribuciones de la temperatura superficial. En consecuencia, al presente, sólo unos pocos trabajos reportan resultados de evaluaciones cuantitativas del flujo de calor a través de la envolvente usando registros termográficos (Goldstein, 1978; Mack, 1985; Grinzato et al., 1990; Grinzato et al., 1998).

En este trabajo de tesis se aplicó la TTIR para determinar las temperaturas superficiales interna (T_{si}) y externa (T_{se}) de los componentes que conforman los 44 sectores constructivos de la envolvente. Para ello se utilizó una cámara termográfica FLUKE TiR32, con detector con matriz de plano focal de 320×240 píxeles basada en microbolómetro no refrigerado. Su sensibilidad térmica (NETD) es $\leq 0.04^{\circ}\text{C}$ a 30°C , con una precisión de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ o 2% y rango de temperatura de -20°C a 150°C . Captura la radiación térmica emitida o reflejada por la superficie de los objetos comprendida en el rango $7.5\ \mu\text{m} < \lambda < 14\ \mu\text{m}$, es decir captura la energía radiada por los cuerpos a temperatura ambiente, y la transforma en imágenes luminosas donde cada pixel se asocia con un valor proporcional a la cantidad de energía recibida, y con ella puede determinarse la distribución de temperatura correspondiente. El valor de la emisividad de los materiales utilizados y la

compensación por la temperatura reflejada de fondo T_r se determinan siguiendo las recomendaciones de Melgosa Revillas (2011) y las normas ASTM (2003, 2011, 2013). Básicamente, un pedazo de una lámina arrugada de aluminio se coloca sobre la región de medición que conformará la imagen IR (Figura 3-7 izquierda). La lectura de la temperatura de la lámina se hace a una distancia de 1 m estableciendo el nivel de emisividad de la cámara en 1. Esta es T_r . Luego, se enfoca una porción de pared cubierta con cinta de vinilo color negro con valores de emisividad de 0.95 ± 0.05 (Figura 3-7 derecha). Estableciendo el nivel de emisividad de la cámara en 0.95 y el valor de T_r obtenido previamente, se mide la temperatura de la cinta. Finalmente, se retira la cinta negra y se mide la temperatura superficial de la pared, variando el valor de emisividad hasta que la temperatura de la pared alcance la temperatura de la cinta.



Figura 3-7: Calibración de la cámara termográfica.

La distancia (≈ 3 m) entre la superficie testeada y la cámara, las dimensiones del edificio y el espesor de las paredes y paneles vidriados se midieron con un medidor laser portátil FLUKE 414D con una precisión de 0.001 m. A 3 m, la atenuación de la radiación IR y la reducción de la nitidez de la imagen debida al aire son despreciables (Chew, 1998). Para evitar el efecto de la reflectividad sobre las mediciones, particularmente en los casos de las superficies vidriadas, se testearon diferentes ángulos de entre 0° y 30° desde la normal a la superficie. Algunas mediciones de la temperatura se chequearon con un termómetro digital Smartmeter y una termo-resistencia PT-100 clase 1/3 adherida a la superficie, con una precisión de $\pm 0.1^\circ\text{C}$. Para evaluar los errores de medición con la

cámara termográfica, se realizó una cantidad de mediciones controladas de temperaturas sobre las diferentes componentes de la envolvente para un rango térmico amplio y diversas condiciones ambientales. De estas pruebas, el error global debido a la incerteza de la emisividad de la componentes de la envolvente, la temperatura de fondo reflejada y la respuesta de la cámara resultó ser menor que 0.7 °C. Los fundamentos teóricos y la aplicación de esta modalidad de trabajo se presentan en §4.1 (Marino et al., 2016).

3.3 Método de la admitancia

Para describir la respuesta dinámica de los edificios a las variaciones de temperatura sinusoidales del ambiente externo puede utilizarse la propiedad dinámica de transferencia como la admitancia térmica. Su uso es sugerido en algunas normas internacionales como la ISO 13786 y siguientes. En estos casos, en lugar de considerar la transmitancia U de un flujo estacionario de calor a través de la envolvente se recurre a la transmitancia dinámica u . Los factores adicionales que aparecen son la atenuación del flujo de energía en función de la distancia o factor de decremento, y un retardo (*time lag*) entre la diferencia máxima de temperatura y el máximo flujo de calor. La técnica se conoce como “método de la admitancia” y fue introducido por Pipes (1957) utilizando la analogía que existe entre la solución del problema térmico y el de una línea de transmisión eléctrica. Davis (1994) desarrolló el método para muros introduciendo la admitancia y el cálculo de matrices de números complejos, y representando gráficamente la relación entre la temperatura y el flujo de calor en forma de diagramas vectoriales dependientes del tiempo (o *fasores*). Davis (1995) y Karnele y Davis (2008) presentaron las soluciones de la ecuación de calor unidimensional para cuatro condiciones de contorno y su aplicación para encontrar los factores de respuesta por medio de mediciones *in situ*. Además estudiaron las respuestas dinámicas empleando condiciones de contorno que incluyen un incremento lineal, variaciones periódicas y cambios de temperatura bruscos en capas de espesor finito, y soluciones autosimilares para un sólido semi-infinito. Li et al. (2009) emplearon el método de la admitancia para determinar la incerteza de la solución de la ecuación de calor. Spitler et al. (2001) reportaron una solución analítica para una pared compuesta de varias capas con una variación sinusoidal de temperatura a la entrada y temperatura constante a la salida. En Inglaterra, los aspectos prácticos relacionados con el cálculo de la admitancia y los valores aceptables para distintos materiales se encuentran resumidos en la guía CIBSE (1986). También es frecuente el uso de programas de simulación que emplean el método de la admitancia para evaluar el comportamiento térmico de los muros mediante el cálculo de los factores de respuesta dinámica, junto con las mediciones de las variables relacionadas (Falconer y Sowell, 1993; Aste et al., 2009).

A pesar de la abundante cantidad de libros (ver, por ejemplo, Davies 2004a) y artículos publicados sobre la transferencia de calor, se observa que los fundamentos físicos subyacentes y las aproximaciones realizadas en los cálculos se presentan dispersos, con vacíos sustanciales, y/o

adaptados a otros problemas (como por ejemplo a circuitos eléctricos y líneas de transmisión) que dificultan la acabada comprensión del método y su aplicación al análisis de la transferencia de calor en edificaciones. La dificultad también radica en la matemática usada para resolver la ecuación del calor con las condiciones de contorno adecuadas, que emplea el álgebra de matrices de números complejos. En §4.2, se revisan e integran la teoría y las soluciones matemáticas que dan cuenta de los efectos de las variaciones térmicas asociadas con la transferencia de calor a través de la envolvente. Se emplean un formalismo sencillo (a partir de conceptos básicos) y el método de separación de variables para resolver la ecuación diferencial, en lugar de transformadas de Laplace. Así, se halla la respuesta térmica de una pared a una variación periódica de temperatura en función de la densidad, espesor, calor específico y conductividad de los materiales que la componen. En el caso de un muro homogéneo de espesor finito, una matriz 2×2 , llamada *matriz de transmisión*, relaciona las temperaturas y el flujo de calor a través de las caras externa e interna. Para pisos y muros contruidos de múltiples capas, se considera que el flujo de calor saliente de una capa ingresa a la siguiente, y las matrices de las n capas individuales que conforman una pared dan lugar a una única matriz global que es el resultado de la multiplicación de las matrices asociadas a cada capa. Luego, se calculan, analizan y comparan las admitancias, los factores de decremento y los tiempos de retardo para siete tipos de muros típicos de construcción (§5.2). Se evalúa la disposición de materiales más adecuada de acuerdo con el uso de las paredes, y la influencia de estas características sobre el flujo de calor que recibe el interior del edificio. El proceso de cálculo evidencia la información física relevante de los materiales y su disposición en el interior del muro que suele permanecer implícita u oculta cuando se emplean códigos numéricos y/o planillas de cálculo. (Muñoz et al., 2015)

3.4 Modelo de regresión lineal multiple

Un aspecto crítico del cálculo del flujo de calor a través de la envolvente es el conocimiento de los valores de los parámetros físicos y coeficientes semi-empíricos presentes en las ecuaciones y de sus incertezas. Si bien estos valores son provistos por las normas IRAM para materiales y aberturas típicas, pueden diferir de los valores reales ante la presencia de pérdidas o ganancias de calor imprevistas o por la ocurrencia de otros factores difíciles de cuantificar asociados con la envolvente, el entorno o el clima local. Además, como se dijo en §2.2, los mecanismos de transferencia de calor y la respuesta térmica de los diferentes componentes constructivos no son completamente independientes entre sí.

Desde un punto de vista matemático, el modelo de caja gris inverso (Berthou et al., 2014; Whiten, 2013; Bohlin, 2006; Braun y Chaturvedi, 2002), que combina la resolución del problema inverso (Figura 2-1) con una estructura teórica parcial para completar la información faltante (es decir, los detalles de la construcción y de la interacción de los procesos físicos), permite determinar cada una de las contribuciones de los diferentes mecanismos de intercambio de calor con el exterior.

En este caso, primero se analiza la correlación de la variación de la temperatura interna del edificio evaluado con la diferencia entre las temperaturas externa e interna; luego, con la intensidad de la radiación solar y finalmente con la intensidad del viento. Estas variables corresponden a los procesos físicos de la conducción térmica a través de la envolvente, del calentamiento por radiación solar y de la transferencia convectiva de calor por acción del viento. Así, es posible la evaluación del comportamiento térmico global de una construcción, es decir de la respuesta conjunta de los diferentes sectores constructivos, determinando la dependencia de cada mecanismo de transferencia analizado. Esta forma de análisis constituye el modelo de regresión lineal. Los valores encontrados de los parámetros característicos suelen coincidir con los proporcionados por las normas IRAM. No obstante, el método no permite analizar todos los procesos físicos simultáneamente, ya que previamente debe establecerse un orden para realizar el análisis. Aplicándolo a diferentes bases de datos, se encuentra que la inadecuada elección de este orden puede dar lugar a resultados erróneos.

Una solución a este inconveniente consiste en emplear el modelo de *regresión lineal múltiple* (MRLM) que permite relacionar linealmente los datos con varias variables simultáneamente. El MRLM puede aplicarse a una base de datos disponible para desarrollar modelos de predicción, validarlo con mediciones in-itu y compararlo con simulaciones y metodologías propuestas para certificación energética de edificaciones y/o normas técnicas y obtener altos coeficientes de correlación (Tiberiu et al., 2013; Salvetti *et al.*, 2010; lordache y lordache, 2006; Sander et al., 1993; O'Neill et al., 1991). Los valores de los parámetros edilicios se encuentran minimizando la suma S del error cuadrático medio $e_{cm,r}$ de las diferencias entre el valor medido y el aproximado de n mediciones, es decir $S = \sum e_{cm,r}^2$ con $1 \leq r \leq n$. En esta tesis se analiza la variación de la temperatura interna generada por la diferencia térmica con el exterior, la intensidad de la radiación solar y la intensidad del viento pero, puesto que el número de variables consideradas en el modelo RLM no tiene límite, se agrega también la diferencia de humedad absoluta entre el interior y el exterior. Las variables corresponden a los procesos de conducción térmica a través de la envolvente, radiación solar, acción convectiva del viento, y calor latente del aire intercambiado con el exterior (o ventilación). La hipótesis básica en la que se sustenta el método es que cada una de estas variables da cuenta de un proceso físico lineal en primera aproximación. Los fundamentos teóricos y la aplicación de esta modalidad de trabajo se presentan en §4.5.1 y §5.5.2, respectivamente. (Muñoz et al., 2016)



4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

4.1 Técnica de termografía infrarroja (TTIR)

La radiación hace posible la transferencia de energía entre una superficie y su entorno mediante la absorción, reflexión y emisión de dicha energía por medio de ondas electromagnéticas. A diferencia de la conducción y convección del calor que necesitan un medio para transportar energía, la radiación se transmite a través del vacío o atravesando el aire con poca atenuación. La radiación emitida por un cuerpo depende del tipo de superficie y de su temperatura T . De interés en este trabajo es la radiación indirecta (o reflejada) proporcionada por el sol o las luces artificiales, la radiación visible y la infrarroja (IR) cercana emitidas por el sol y luminarias, y la IR lejana emitida por los cuerpos a temperatura ambiente ($T \approx 300$ K), a veces denominadas radiación térmica de “onda corta” y “onda larga”, respectivamente. La primera tiene longitudes de onda λ entre 0.2 y 3.0 μm , característica de las fuentes de alta temperatura ($T > 3000$ K) e incluye el espectro ultravioleta cercano ($0.20 \mu\text{m} < \lambda < 0.38 \mu\text{m}$), el visible ($0.38 \mu\text{m} < \lambda < 0.78 \mu\text{m}$) y el IR cercano ($0.78 \mu\text{m} < \lambda < 3.0 \mu\text{m}$). La radiación térmica de onda larga abarca el IR lejano con $3.0 \mu\text{m} < \lambda < 50 \mu\text{m}$, y es característica de fuentes de radiación a temperatura ambiente. Ambas son absorbidas en parte por los materiales que nos rodean, pero la segunda también es parcialmente emitida.

El coeficiente de absorción, o absorbancia α , es la fracción de la radiación incidente absorbida por la superficie, mientras que el resto es reflejada (especificada por la reflectancia r) y/o transmitida (especificada por la transmitancia τ) si la superficie es parcialmente transparente. En una situación estacionaria, el principio de conservación de la energía implica que $\alpha + r + \tau = 1$. La radiación absorbida depende de λ , calienta el material próximo a la superficie por conducción, se disipa en el aire en contacto con la superficie por convección, o se reenvía al exterior como radiación IR. La absorbancia α_s de la radiación térmica de onda corta es característica de cada material y se encuentra en el rango 0.1-0.95, mientras que la de onda larga α_l tiene el mismo valor que la emisividad ε definida como la relación entre la energía radiada desde la superficie del material y aquella radiada desde un cuerpo negro a la misma temperatura.

Una forma frecuente de definir a las superficies es determinando si ellas son reflectoras si $\alpha_s, \tau < 20\text{-}25\%$ o tienen un comportamiento similar al de los “cuerpos negros” si $\alpha_s, \varepsilon > 80\text{-}85\%$. Alternativamente, los materiales pueden clasificarse de acuerdo a su albedo, o fracción de radiación reflejada respecto a la radiación incidente. Así, las superficies reflectoras tienen un valor alto de albedo ($> 0.80\text{-}0.85$) mientras que para los “cuerpos negros” es bajo ($< 0.20\text{-}0.25$). Ambas clasificaciones se relacionan cuando se aplican a los cuerpos opacos ($\tau \approx 0$) para los que a un valor alto de r corresponde un valor bajo de α , y viceversa. Debe notarse que el albedo es comúnmente asociado con la intensidad promedio de la radiación en un rango de longitudes de onda,

normalmente el de la luz visible. Para las edificaciones, sin embargo, conviene hacer un análisis más detallado entre la radiación visible y la IR cercana para la radiación incidente, y entre la radiación visible y el IR lejano para la reflejada. Como consecuencia, es posible diferenciar las superficies selectivas calientes ($\alpha_c > 80-85\%$, $\varepsilon < 20-25\%$) y frías ($\alpha_c < 20-25\%$, $\varepsilon > 80-85\%$), además de las reflectoras y las que se comportan como “cuerpos negros” (DeKay y Brown, 2013).

La mayoría de los materiales usados en construcciones son opacos a la radiación IR, es decir que para ellos $\tau \approx 0$, de manera que $\alpha + r \approx 100\%$. Además, predominan las superficies con emisividad alta (e.g. cal, pintura blanca, ladrillo rojo) con $\varepsilon \approx 0.9-0.95$. Las superficies vidriadas comunes también son opacas a la radiación IR lejana ($\lambda > 3\mu\text{m}$), tienen una alta emisividad, son transparentes a la radiación visible y reflejan en forma especular. Esto importa especialmente para realizar mediciones con la cámara termográfica.

Tomando en consideración estos conceptos básicos, el flujo de calor en estado estacionario por unidad de área, q_{ss} (o densidad del flujo de calor en W/m^2 en el SI de unidades), a través de la envolvente de un edificio es

$$q_{ss} = U(T_e - T_i), \quad (4.1)$$

donde U es la transmitancia térmica global. En el caso de muros y aberturas al exterior, el valor de U se obtiene por medio de la resistencia térmica total $R_T = U^{-1}$ que es la suma de tres términos:

$$R_T = \frac{1}{U} = R_{si} + \sum_{j=1}^N \frac{e_j}{k_j} + R_{se}, \quad (4.2)$$

donde e_j y k_j representan el espesor y la conductividad térmica del material ($\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$) que compone cada capa j de la pared cuyos valores se encuentran tabulados para los estándares argentinos en la norma IRAM 11601. Las Tablas 3.ii y 3.iii muestran los valores de R_T para algunos materiales de interés para esta tesis. Observar en Ec. (4.2) que un término corresponde a la conducción en el material y los otros representan dos resistencias térmicas superficiales, R_{si} y R_{se} , asociadas con las capas límite de aire interna y externa, respectivamente, establecidas por la convección natural del aire en contacto con las superficies. La norma IRAM 11601 también establece para el diseño los valores constantes $R_{si} \approx 0.13$ y $R_{se} \approx 0.04\text{m}^2\text{C}/\text{W}$ para los muros verticales (Tabla 2.i), aunque en su texto se aclara que “la resistencia térmica superficial varía en función de numerosos parámetros, tales como las propiedades de la superficie, en particular la emisividad, la velocidad del aire a lo largo de la superficie, y las temperaturas de la superficie, del aire ambiente y de las superficies circundantes”. Comúnmente el coeficiente externo de transferencia térmica h_e (Tabla 2.i) se relaciona con la acción del viento (IRAM 11603, 2011).

La transferencia de calor por convección natural en un plano vertical depende, en la práctica, de si el régimen en la capa límite de aire es laminar o turbulento, de la longitud del plano (tomada como distancia característica) y del número de Rayleigh Ra . La ecuación que describe la transferencia de calor se complica aún más al agregar la acción del viento en una convección mixta (convección

natural y forzada actuando simultáneamente). Esto lleva a que se adopten valores constantes para estimar las resistencias superficiales, como aquellos de las normas IRAM, para establecer la envolvente más adecuada a la zona bioclimática de construcción. Sin embargo, puede emplearse la metodología descripta a continuación para establecer las resistencias superficiales en una edificación pre-existente (Thomas et al., 2014).

Debido a las distintas capas de materiales que componen los muros se establecen, en función de las temperaturas del ambiente interior T_i y del aire exterior T_e , las temperaturas sobre las caras interna T_{si} y externa T_{se} . Para fijar ideas, considérese el muro homogéneo ilustrado en la Figura 4-1. El flujo de calor en el estado estacionario es el mismo en todas las capas y su valor es dado por (4.1) que, usando (4.2), se transforma en:

$$q_{ss} \left(R_{si} + \frac{e}{k} + R_{se} \right) = (T_i - T_e). \quad (4.3)$$

Luego,

$$q_{ss} R_{si} = T_i - T_{si}, \quad (4.4a)$$

$$q_{ss} \frac{e}{k} = T_{si} - T_{se}, \quad (4.4b)$$

$$q_{ss} R_{se} = T_{se} - T_e, \quad (4.4c)$$

y las resistencias relativas resultan:

$$\frac{R_{si}}{R_T} = \frac{T_i - T_{si}}{T_i - T_e}, \quad (4.5a)$$

$$\frac{e/k}{R_T} = \frac{T_{si} - T_{se}}{T_i - T_e}, \quad (4.5b)$$

$$\frac{R_{se}}{R_T} = \frac{T_{se} - T_e}{T_i - T_e}. \quad (4.5c)$$

El flujo de calor que se pierde a través del área total A de la superficie es $Q = q_{ss}A$ calculado de acuerdo a la Norma IRAM 11601 sumando las diferentes contribuciones de la envolvente. Las

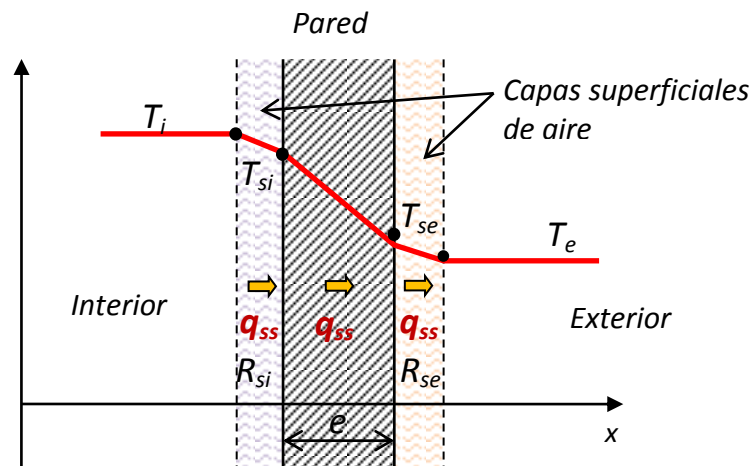


Figura 4-1: Variación de temperatura entre el interior y el exterior de la construcción, considerando las capas superficiales de aire de la envolvente.

Ecs. (4.4)-(4.5) reflejan la importancia de realizar mediciones de las temperaturas superficiales en la envolvente, no sólo en el laboratorio bajo condiciones controladas, sino en condiciones reales del sitio donde se emplaza la edificación. En efecto, midiendo T_{se} y T_{si} con la cámara termográfica como se describe en §3.2.2 y considerando el espesor e y la conductividad k del material en cada caso, q se calcula mediante (4.4b) y las resistencias superficiales mediante (4.4a) y (4.4c). Las ecuaciones (4.1)-(4.5) son útiles si el estado estacionario fuese una aproximación válida. Una forma de verificarlo es calculando los factores dinámicos utilizando el método de la admitancia.

4.2 Método de la admitancia - Solución periódica de la ecuación del calor

4.2.1 Flujo de calor unidimensional en un medio no homogéneo

Consideremos un material homogéneo de densidad $\rho(x)$, calor específico $C_p(x)$ y conductividad térmica $k(x)$ en el que tiene lugar una distribución de temperatura $T(x,t)$. La ley de Fourier para la conducción del calor establece que el flujo de calor por unidad de área perpendicular al eje x es proporcional al gradiente de temperatura:

$$q(x,t) = -k(x) \frac{\partial T(x,t)}{\partial x}. \quad (4.6)$$

Luego, la cantidad de calor que entra, por unidad de área y de tiempo, a una capa ubicada entre x y $x+dx$ es:

$$dq(x,t) = -\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx. \quad (4.7)$$

Por otra parte, la energía por unidad de volumen y a presión constante es:

$$e_V(x,t) = C_p \rho(x) T(x,t), \quad (4.8)$$

donde el factor ρC_p ($\text{Jm}^{-3}\text{°C}^{-1}$) multiplicado por el volumen analizado es la capacidad calorífica del material conocida también como *masa o inercia térmica*. Si no hay fuentes o sumideros de energía en el material, la conservación de la energía implica que

$$\frac{\partial e_V}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0. \quad (4.9)$$

Analizando variaciones temporales y espaciales suaves de energía, q no puede sufrir cambios bruscos en las diferentes partes del material. Por el contrario, el gradiente de temperatura cambia bruscamente si lo hace la conductividad (Ec. 4.6) como ocurre, por ejemplo, en una interface (en §5.4.1 se presenta un ejemplo). Introduciendo las Ecs. (4.7) y (4.8) en Ec. (4.9), resulta

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{1}{\rho C_p} \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) = 0. \quad (4.10)$$

Para el caso de un material homogéneo, se obtiene la conocida ecuación (de difusión) del calor:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - D \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0, \quad (4.11)$$

donde $D = k/\rho C_p$ es la difusividad térmica (m^2/s). Notar que la Ec. (4.6) es válida también para el estado estacionario en cuyo caso q depende sólo de la conductividad, mientras que si hay variaciones temporales de temperatura debe resolverse la Ec. (4.11) para la que T y q dependen de la combinación de la conductividad, la densidad y el calor específico del material expresada por D .

Las Ecs. (4.6) y (4.11) son análogas a aquellas que gobiernan la evolución de la corriente y el potencial eléctricos (flujo de calor y temperatura, respectivamente) en un cable de capacitancia ρC_p y resistencia k^{-1} por unidad de longitud (Pipes, 1957). Esta analogía hace posible el uso, en el caso de conducción del calor, del formalismo matemático implementado para resolver los problemas relacionados con los circuitos eléctricos. También implica que la función $q(x,t)$ está adelantada hasta un máximo igual a $\pi/2$ con respecto a $T(x,t)$. Esto se debe a que, en términos simples, el calor tiene que ser almacenado en el material antes de que pueda incrementar su temperatura.

Para nuestro propósito, interesan las soluciones periódicas de la Ec. (4.11) con periodo P y frecuencia angular $\omega = 2\pi/P$ y con la forma $T(x,t) = X(x)\Theta(t)$ para la cual $\Theta(t) = e^{i\omega t}$ siendo $i = \sqrt{-1}$ la unidad imaginaria. Para la parte espacial, la ecuación diferencial es:

$$\frac{\partial^2 X(x)}{\partial x^2} - \frac{i\omega}{D} X(x) = 0, \quad (4.12)$$

cuya solución general es:

$$X(x) = c_1 e^{+\sigma x} + c_2 e^{-\sigma x} \quad (4.13)$$

con c_1 y c_2 constantes, y $\sigma = \sqrt{i\omega/D} = (i+1)\sqrt{\omega/2D}$ ya que $\sqrt{i} = (i+1)/\sqrt{2}$. Notar que la solución (4.13) es diferente a la encontrada en la resolución de los problemas clásicos (Lienhard y Lienhard, 2011; Weigand, 2015) relacionados a la conducción del calor transitoria (enfriamiento de una barra, por ejemplo) donde se elige una combinación de senos y cosenos en lugar de funciones exponenciales.

4.2.2 Flujo de calor en un medio semi-infinito

Un caso sencillo e ilustrativo es el del flujo de calor a través de un medio semi-infinito ($x \geq 0$) cuando la temperatura superficial T_s varía sinusoidalmente con amplitud T_0 y frecuencia angular ω (Lienhard y Lienhard, 2011; Baehr y Stephan, 2006). En este caso las condiciones de contorno (CC) son: $T(x=0, t) = T_0$ y $T(x=\infty, t) = 0$, y las constantes $c_1 = 0$ y $c_2 = T_0$. La solución resulta:

$$T(x,t) = T_0 e^{-(i+1)x\sqrt{\omega/2D}} e^{i\omega t} = T_0 e^{-x\sqrt{\omega/2D}} e^{i(-x\sqrt{\omega/2D} + \omega t)}. \quad (4.14)$$

De la Ec. (4.6) se encuentra que el flujo de calor correspondiente a (4.14) es:

$$q(x,t) = kT_0 \sqrt{\omega/2D} (i+1) e^{-x(i+1)\sqrt{\omega/2D}} e^{i\omega t} \quad (4.15)$$

Observar que los valores con sentido físico son los que conforman la parte real de (4.14) y (4.15). La Ec. (4.15) es la solución periódica unidimensional del flujo de calor en un medio uniforme semi-infinito. Contiene un término oscilatorio de propagación ($k_0 x \pm \omega t$), con $k_0 = \sqrt{\omega/2D}$: número de onda, que implica una velocidad de propagación $\omega/k_0 = \sqrt{2\omega D}$, mientras la amplitud decae exponencialmente con una distancia característica (Davis, 1994):

$$x^* = \sqrt{2D/\omega} = \sqrt{2\lambda/\omega\rho C_p} \quad (4.16)$$

Esta distancia de penetración x^* en la pared (única para cada material) es la longitud a la cual los efectos de la fuente localizada en $x = 0$ son importantes, y es menor cuanto mayor es la frecuencia. Si una pared tiene un espesor mayor que el especificado por Ec. (4.16), la transferencia de calor desde el exterior es mínima. Esto es debido a la reducida respuesta térmica de la pared a los cambios temporales de frecuencia ω , y no por la baja conductividad térmica del material. En la Tabla 4.i se listan algunos de los materiales de construcción más comunes con sus propiedades incluyendo el espesor usual e de cada capa y el valor de x^* calculado con Ec. (4.16). Notar que existen varios materiales (resaltados en gris) para los cuales $x^* < \ell$, donde ℓ es el ancho total de la pared. La Figura 4-2 muestra las variaciones de la temperatura y del flujo de calor con la posición para diferentes tiempos de un semi-ciclo, siendo $q_0 = kT_0\sqrt{\omega/2D}$.

	e (m)	k (W/mK)	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kgK)	$D \times 10^6$ (m ² K/W)	x^* (m)
Revoque fino	0.005	0.700	1400	1012	0.49	0.12
Revoque grueso	0.020	0.930	1400	1050	0.63	0.13
Ladrillo hueco	0.120	0.293	800	920	0.40	0.10
Ladrillo macizo	0.12-0.28	0.850	1500	1000	0.57	0.12
Tabique	0.140	0.700	1970	800	0.44	0.11
Hormigón	0.100	1.400	2200	800	0.80	0.15

Tabla 4.i. Listado de las propiedades de materiales comunes de construcción.

Debido a que la ecuación diferencial (4.11) es parabólica, la temperatura y su derivada espacial, el flujo de calor, están unívocamente definidos en todo el espacio y tiempo si se definen las condiciones de contorno adecuadas. Al tomar la solución como periódica, la condición inicial debe ser consistente con la distribución de la temperatura dada por la Ec. (4.14), o de lo contrario debe buscarse una solución transitoria hasta el establecimiento del régimen periódico, como se hace para la resolución numérica en §4.4. Otra propiedad importante de la ecuación del calor es que se trata de una ecuación lineal y por lo tanto vale el principio de superposición. De esta forma, la distribución de

temperatura (respuesta del sistema lineal) resultante de la acción de una serie de fuentes es la suma (o superposición) de las distribuciones para cada fuente particular. También vale el análisis de Fourier y las transformadas de Laplace, etc.

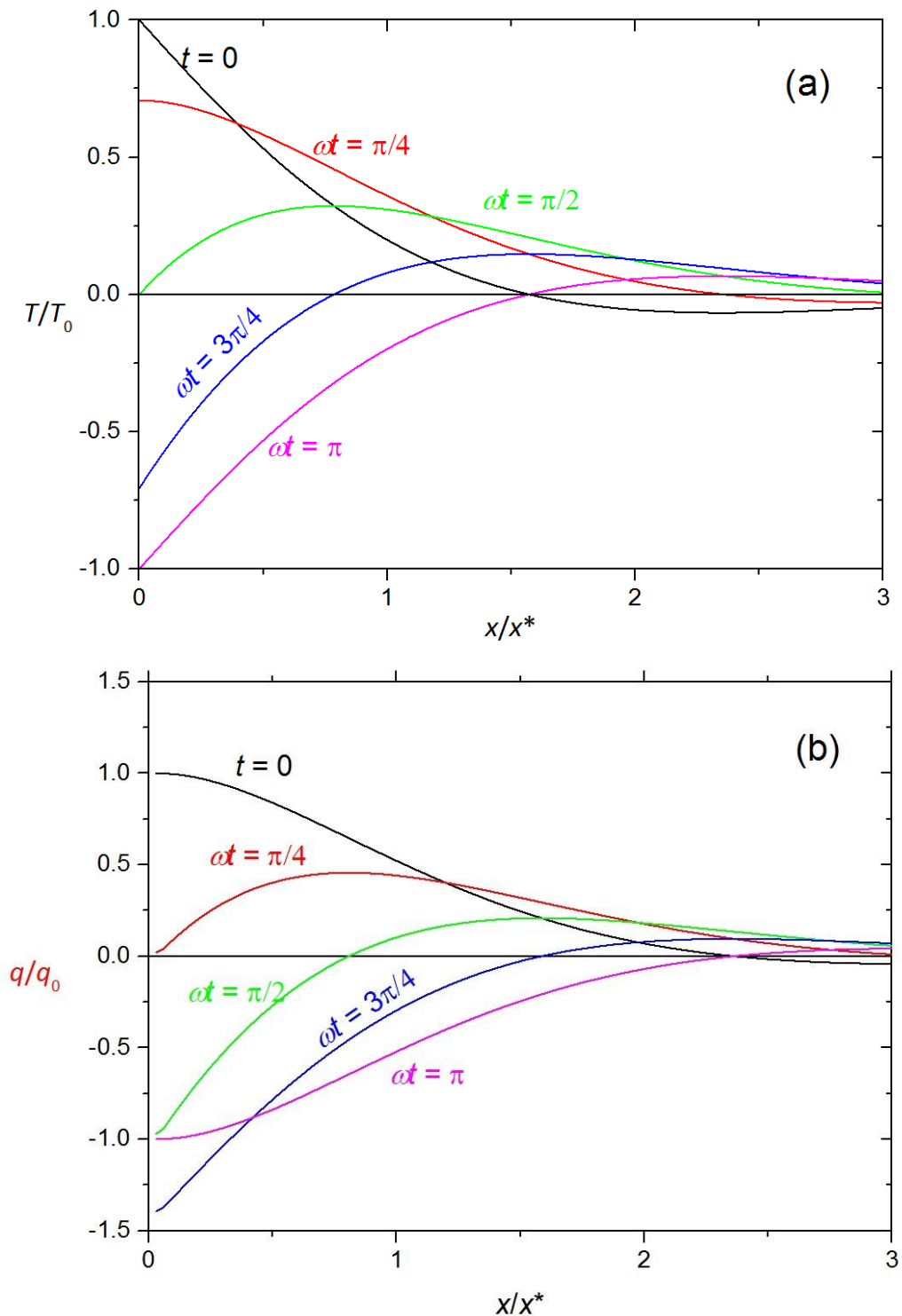


Figura 4-2: Perfiles de (a) temperatura y (b) flujo de calor para algunos tiempos del primer semi-ciclo.

4.2.3 Flujo de calor en una placa plana ante variaciones sinusoidales de T_e

Consideremos ahora el flujo de calor en una capa de material homogéneo, desde $x = 0$ (superficie externa de la pared) hasta $x = \ell$ (superficie interna). Las variaciones temporales son

periódicas y función de $e^{-\omega t}$ en todos los términos, como se indica en la Figura 4-3. La frecuencia angular es $\omega = 2\pi/P$ y el periodo es $P = 1 \text{ día} = 86400 \text{ s}$. Así, la temperatura sobre la superficie externa varía de acuerdo con $T_{se}(t) = T_{se0}e^{-\omega t}$ y sobre la superficie lo hace de acuerdo con $T_{si}(t) = T_{si0}e^{-\omega t}$, con T_{se0} y T_{si0} : números imaginarios; análogamente se consideran los flujos de calor $q_{se}(t)$ y $q_{si}(t)$. El problema se resuelve encontrando la relación entre T_{se0} , q_{se0} , T_{si0} y q_{si0} resolviendo la Ec. (4.12). Sin pérdida de generalidad, la solución (4.13) puede expresarse en la forma:

$$X(x) = c_1 \cosh(\sigma x) + c_2 \sinh(\sigma x). \quad (4.17)$$

Cuando se conocen los valores de T_{se0} y q_{se0} en $x = 0$, las constantes en (4.17) resultan $c_1 = T_{se0}$ y $c_2 = -q_{se0}/\lambda\sigma$. Recordando que $\sqrt{i} = \frac{(i+1)}{\sqrt{2}}$, considerando la Ec. (4.16) y definiendo:

$$\sigma\ell = \sqrt{\frac{i\omega}{D}}\ell = (i+1)\Gamma \quad \text{con} \quad \Gamma = \sqrt{\frac{\omega\ell^2}{2D}} = \sqrt{\frac{\pi\ell^2\rho C_p}{86400\lambda_o}} = \frac{\ell}{x^*} \quad (\text{en unidades MKS}), \quad (4.18)$$

se obtienen:

$$T_{si0} = T_{se0} \cosh[\Gamma(i+1)] + q_{se0} \frac{\ell}{\lambda(\sigma\ell)} \sinh[\Gamma(i+1)] \quad (4.19)$$

$$q_{si0} = \frac{\lambda(\sigma\ell)}{\ell} T_{se0} \sinh[\Gamma(i+1)] + q_{se0} \cosh[\Gamma(i+1)] \quad (4.20)$$

En forma matricial, (4.19) y (4.20) se expresan como sigue:

$$\begin{bmatrix} T_{si0} \\ q_{si0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{se0} \\ q_{se0} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

con

$$m_{11} = \cosh[\Gamma(i+1)] \quad , \quad m_{12} = \frac{\ell}{\lambda} \frac{\sinh[\Gamma(i+1)]}{\Gamma(i+1)} \quad , \quad m_{21} = \frac{\lambda}{\ell} \Gamma(i+1) \sinh[\Gamma(i+1)] \quad (4.22)$$



Figura 4-3: Flujo de calor a través de una pared homogénea.

La *matriz de transmisión* se compone de las funciones de transferencia m_{ij} . Para muros compuestos de un número N de capas en contacto que ocupan el espacio $0 < x < \ell$ desde el exterior ($x = 0$) hasta el interior ($x = \ell$), la formulación puede extenderse directamente por técnicas del álgebra de matrices para dar

$$\begin{bmatrix} T_{i0} \\ q_{i0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & R_{se} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}_{capa1} \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}_{capa2} \dots \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}_{capaN} \begin{bmatrix} 1 & R_{si} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{e0} \\ q_{e0} \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

$$\text{o} \quad \begin{bmatrix} T_{i0} \\ q_{i0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & R_{se} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & R_{si} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{e0} \\ q_{e0} \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

donde los valores de los elementos $a_{ij}(\Gamma)$ de la matriz de transmisión global dependen de las propiedades de los materiales que componen las múltiples capas y del orden en el que se combinan las matrices de transmisión individuales. En (4.23) y (4.24) se incluyen las matrices correspondientes a las capas límites de aire sobre las superficies exterior e interior del muro. En ambos casos, como para el aire $\rho C_p \approx 0$, resulta que $m_{11} = 1$, $m_{12} = R_s$ y $m_{21} = 0$. Los valores de las resistencias térmicas superficiales para las superficies interna, R_{si} , y externa, R_{se} , se indicaron en la Tabla 2.i. Notar que las Ecs. (4.23) y (4.24) dan cuenta ya no de las temperaturas superficiales, sino de las amplitudes T_{e0} y T_{i0} de las temperaturas ambiente externa $T_e(t) = T_{e0}e^{-i\omega t}$ e interna $T_i(t) = T_{i0}e^{-i\omega t}$ respectivamente. Por lo tanto, cuando se conocen T_{e0} y T_{i0} , de (4.17) surge que $c_1 = T_{e0}$ y $c_2 = T_{i0} - T_{e0} \cosh(\sigma\ell)/\sinh(\sigma\ell)$. La solución, expresada en forma matricial, queda

$$\begin{bmatrix} q_{e0} \\ q_{i0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{e0} \\ T_{i0} \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

$$b_{11} = \frac{\lambda}{\ell} \Gamma(i+1) \frac{\cosh[\Gamma(i+1)]}{\sinh[\Gamma(i+1)]}, \quad b_{12} = \frac{\lambda}{\ell} \frac{\Gamma(i+1)}{\sinh[\Gamma(i+1)]} \quad (4.26)$$

$$b_{21} = \frac{\lambda}{\ell} \Gamma(i+1) \left[\sinh[\Gamma(i+1)] - \frac{\cosh^2[\Gamma(i+1)]}{\sinh[\Gamma(i+1)]} \right], \quad b_{22} = -\frac{\lambda}{\ell} \Gamma(i+1) \frac{\cosh[\Gamma(i+1)]}{\sinh[\Gamma(i+1)]} = -b_{11} \quad (4.27)$$

También es posible despejar los elementos de la matriz b_{ij} a partir de los a_{ij} indicados en las Ecs. (4.22) y conseguir $b_{11} = -a_{11}/a_{12}$, $b_{12} = 1/a_{12}$, $b_{21} = a_{21} - a_{11}^2/a_{12}$, $b_{22} = a_{11}/a_{12} = -b_{11}$, reobteniendo las Ecs. (4.26)-(4.27).

4.2.4 Aplicación: flujo de calor a través de una pared plana

El formalismo desarrollado hasta aquí permite encontrar la solución analítica de la ecuación diferencial (4.12) con CC sinusoidales. Para aplicar esta solución a un caso concreto, se toma la fase de la temperatura $T_e(t)$ como referencia, y en consecuencia T_{e0} es un número real. Los coeficientes b_{11} y b_{21} proporcionados por las Ecs. (4.26) y (4.27) son números complejos cuya parte real

representa la amplitud de las variaciones de q , y la parte imaginaria representa el desfase φ con respecto a la fase de las variaciones de $T_e(t)$; por ejemplo, el flujo de calor a través de la superficie externa es $\text{Re}\{q_e(t)\} = \text{Re}\{q_{e0}e^{-i\omega t}\} = \text{Re}\{q_{e0}\cos(\omega t + \varphi)\}$, con $\varphi = \text{Im}\{q_{e0}\}$. Para muros multicapas, se construye una matriz de números complejos para cada capa, y los coeficientes b_{11} y b_{12} para el ancho total del muro se calculan multiplicando las matrices como indica Ec. (4.24).

Para representar las variaciones reales de la temperatura superficial usando el método de la admitancia, primero debe descomponerse $T_e(t)$ en serie de Fourier. Luego, se hallan las soluciones de las Ecs. (4.6) y (4.25-27) para cada componente del desarrollo en serie. Como el principio de superposición es válido (§4.2.2), la solución general es la suma de las soluciones encontradas para cada componente del desarrollo en serie.

La condición de confort implica tomar $T_i(t) \approx 20^\circ\text{C}$ (constante), es decir, puede considerarse que la amplitud de las variaciones de la temperatura interna es despreciable ($T_{i0} \approx 0$). Por otra parte, $T_e(t)$ depende del tiempo local. Esencialmente, T_e presenta variaciones periódicas estacionales ($P = 365$ días) y diarias ($P = 1$ día), y otras fluctuaciones asociadas con las condiciones meteorológicas. Para las paredes típicas de la envolvente del edificio de la Biblioteca Central, resulta $\omega \ell^2 / 2D = \ell^2 / \alpha P \ll 1$ para $P = 365$ días y $\omega \ell^2 / 2D \approx 1$ para $P = 1$ día. Esto indica que las variaciones estacionales son lentas y que el flujo de calor a través del muro puede ajustarse a las variaciones de temperatura experimentadas por las superficies interna y externa (i.e., se satisface una condición aproximada de estado estacionario), a diferencia de lo que ocurre con las variaciones diarias.

4.2.5 Factores de respuesta dinámicos

Los principales factores de respuesta derivados de la matriz de transmisión que permiten describir el comportamiento térmico de las paredes frente a variaciones cíclicas de temperatura, son:

- La capacidad de intercambio de calor de un material con el ambiente o **admitancia térmica** Y [$\text{W}/\text{m}^2\text{C}$]. Se define como la relación entre la amplitud compleja de la variación sinusoidal de la energía absorbida por unidad de área y tiempo (o flujo de calor) y la correspondiente amplitud de la variación de temperatura, cuando en la contracara del muro se fija una temperatura constante (i. e., se trata del caso isotérmico):

$$Y_e = \frac{q_{e0}}{T_{e0}} = \left| \frac{a_{11}}{a_{12}} \right| \quad \text{cuando } T_{s0} = 0 \quad \text{y} \quad Y_i = \frac{q_{i0}}{T_{i0}} = \left| \frac{a_{22}}{a_{12}} \right| \quad \text{cuando } T_{s0} = 0. \quad (4.28)$$

Dado que $a_{11} = a_{22}$, se verifica que $Y_e = Y_i$. La admitancia depende de las propiedades del material: densidad, capacidad térmica y conductividad térmica (de acuerdo a la Tabla 4.i) en los primeros 0.10 m desde la superficie para un ciclo de 24 h. También depende del período temporal de las oscilaciones de temperatura y de la resistencia de la capa superficial de aire. Los valores típicos para los materiales comunes de construcción varían entre 0.7 y 8.0. La admitancia es alta para una

pared metálica gruesa y es baja para una pared de material aislante poco denso. El límite superior es establecido por la transferencia de calor a través de la capa límite, considerando que la resistencia de la película de aire es $0.12 \text{ m}^2\text{C}/\text{W}$, que se suma a la resistencia térmica del material.

- La **transmitancia dinámica** u relaciona la amplitud del flujo de calor saliente de la superficie interna y la amplitud de la variación de temperatura sobre la superficie externa:

$$u = \frac{q_{i0}}{T_{e0}} = \frac{1}{a_{12}} \quad \text{cuando} \quad T_{i0} = 0. \quad (4.29)$$

Nótese que el cálculo de u da cuenta del flujo de calor que atraviesa la pared generado por la diferencia entre las variaciones de las temperaturas externa e interna, y no la diferencia entre los valores medios de tales temperaturas.

- Existe cierta analogía entre la admitancia, la transmitancia dinámica u y la transmitancia térmica U (todas con unidades de $\text{W}/\text{m}^2\text{C}$) de una pared, pero U (Ec. 4.1) se refiere al estado estacionario y no depende de la densidad o del calor específico del material. Tanto Y como u son números complejos y pueden expresarse mediante una amplitud y una fase. Por lo tanto, los dos parámetros que se relacionan con la transmitancia térmica son el **factor de decremento** $f = |u|/U$, que proporciona la amortiguación de las variaciones periódicas de la temperatura externa al pasar al interior, y el **tiempo de retraso** $\varphi = \frac{12}{\pi} \arg(u)$ transcurrido entre los momentos en los que se alcanza el máximo del flujo de calor a través de la superficie interna y el máximo de temperatura externa.

Como ejemplo, sea una pared de ladrillos comunes con revoques de 0.02 m y resistencias superficiales R_{se} y R_{si} , dispuestos de modo tal que el espesor de la capa de ladrillos adopta el valor $\ell \approx 0.05 \text{ m}$ en la disposición en panderete hasta $\ell \approx 0.48 \text{ m}$ en la disposición de doble tizón. En la Figura 4-4(a) se observa que $U (= R_T^{-1})$ decrece a medida que aumenta ℓ , mientras que u disminuye aún más indicando una reducción adicional del flujo de calor que llega al lado interno debido a la respuesta del material a las variaciones temporales. Por su parte, la admitancia dinámica Y_e crece hasta alcanzar su máximo para $\ell \approx 0.20 \text{ m}$. (Para espesores mayores, el flujo de calor intercambiado con el exterior no cambia ya que $Y_e \rightarrow \text{const}$ para $\ell \rightarrow \infty$, aunque el que pasa al otro lado de la pared sigue disminuyendo, como lo confirma la reducción de f (Figura 4-4b), a la vez que se retrasa hasta alcanzar el desfase máximo ($\varphi = 12 \text{ h}$).

A veces se adopta la masa de los muros como un indicador simplificado de la inercia térmica. Aste *et al.* (2009) compararon f y φ asociado con la masa por unidad de superficie en 24 tipos de paredes. Encontraron que, en general, el f disminuye y φ aumenta a medida que la masa aumenta. Sin embargo, la relación no es unívoca puesto que diferentes valores de los factores dinámicos pueden corresponder a un mismo valor de la masa. Por lo tanto, la masa por sí sola no constituye un buen indicador de la inercia térmica de los sistemas de construcción.

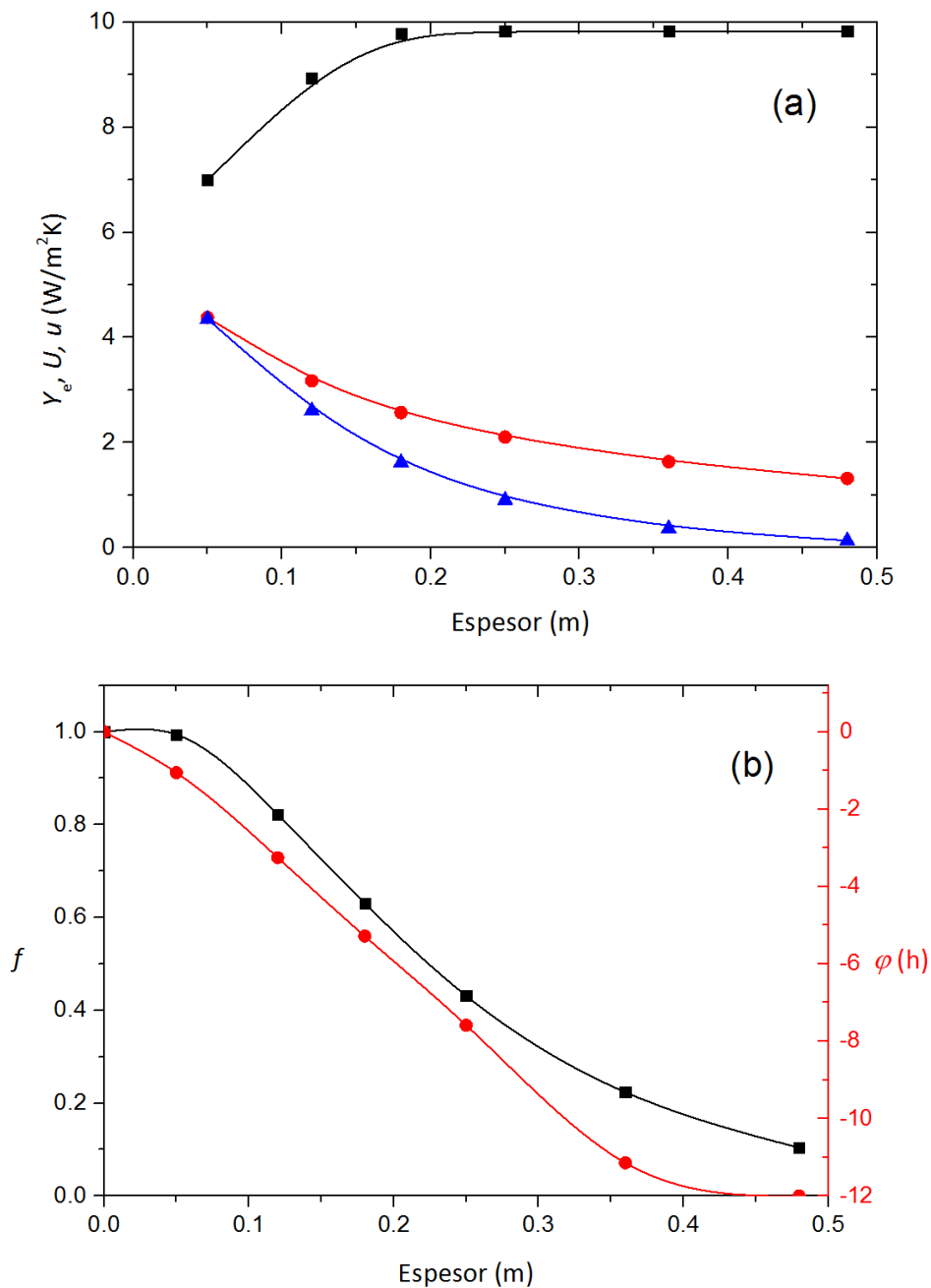


Figura 4-4: (a) Admitancia Y_e (negro) y transmitancia dinámica u (azul), transmitancia estacionaria U (rojo, y (b) factor de decremento f (negro) y desfase ϕ (rojo), en función del espesor ℓ de un muro de ladrillos comunes con revoque.

4.3 Modelos asociados con la radiación solar

La adecuada gestión de la energía solar tiene relación directa con la forma, habitabilidad, confort y ordenación volumétrica de los edificios. En particular la irradiancia solar I_t , o energía por unidad de tiempo y área que incide sobre una superficie, depende de la orientación e inclinación de la misma, de la ubicación astronómica de la Tierra y el sol, y de la absorción de dicha energía por la atmósfera. El valor promedio de la energía recibida por una superficie afuera de la atmósfera se conoce como *constante solar* $C_s = 1367 \text{ W/m}^2$. El 25% de esta energía es absorbida y/o dispersada por los componentes atmosféricos antes de alcanzar la superficie terrestre. La radiación que

finalmente llega hasta la superficie terrestre es la *radiación directa* I_n mientras que la dispersada en la atmosfera es la *radiación difusa* I_{dif} . Ambos tipos de radiación pueden calcularse para una localización determinada y en cualquier momento del año utilizando el *modelo de cielo claro* que se describe más abajo. En presencia de nubes, polución y/o humo, parte de la radiación directa se convierte en radiación difusa adicional. En estos casos, la radiación difusa aumenta hasta convertirse en casi la radiación total.

La aplicación del modelo de cielo claro considera un coeficiente de claridad que depende de la localización y de la nubosidad promedio mensual. Si se cuenta con los valores promedios de estos parámetros, es posible obtener un análisis estadístico del efecto de la radiación solar sobre la conducción del calor a través de la envolvente edilicia. Alternativamente, pueden usarse las mediciones de radiación solar realizadas por estaciones meteorológicas equipadas con sensores que suelen medir la *radiación solar global* sobre una superficie horizontal y, por lo tanto, los valores obtenidos tienen que descomponerse en radiación directa y radiación difusa. El modelo más sencillo de aplicar es el isotrópico de Liu y Jordan (1960) el cual permite cuantificar la energía solar directa y la difusa a partir de la radiación normal medida sobre una superficie horizontal. El efecto de la nubosidad es contemplado mediante un *factor de claridad* general definido como una relación entre la radiación solar incidente sobre una superficie horizontal y la radiación solar incidente con el mismo ángulo sobre una superficie horizontal que se encuentra fuera de la atmósfera terrestre.

La radiación recibida en una dada localización depende de su longitud LON y latitud LAT y de la hora del día. El tiempo se refiere a la posición del sol en el horizonte y es independiente de las convenciones locales del tiempo (e.g. tiempo de verano, tiempo de invierno, etc.). Para hacer esto, se usan el tiempo local estándar TLS y el tiempo solar aparente TSA . TLS se define como el tiempo en el que el sol se encuentra en su posición más elevada en el cielo y es independiente de las variaciones temporales entre dos pasajes sucesivos del sol a través del mismo meridiano; en consecuencia, la longitud del día es constante a lo largo del año. TSA es el intervalo entre dos regresos sucesivos del sol al meridiano local. Puesto que la velocidad orbital de la Tierra varía a lo largo del año, TSA también varía un poco con respecto al tiempo medio mantenido por un reloj funcionando a tasa uniforme. Esta diferencia entre TSA y TLS se conoce como ecuación del tiempo ET y varía entre -14 y 16 min a lo largo del año (cada año es diferente debido a la suma de un día en años bisiestos). Además del cálculo correcto del tiempo, el sol debe localizarse apropiadamente. El ángulo horario H es el desplazamiento angular del sol hacia el E o el O del meridiano local debido a la rotación terrestre y se mide en grados o horas ($1\text{ h} = 15^\circ$). Es $H = 0$ en el mediodía/apogeo solar (cercano al tiempo local = 13:00 h, $TSA \approx 12\text{ h}$), positivo por la tarde y negativo por la mañana. La declinación solar δ es el ángulo entre la línea Tierra-sol y el plano ecuatorial, y varía a lo largo del año entre -23.45° durante el solsticio de verano (21–22 Diciembre) y $+23.45^\circ$ durante el solsticio de invierno (21–22 Junio).

Además de la variación de la posición del sol entre el E y el O, es necesario ubicar la altitud del sol respecto a la superficie terrestre, la cual depende de LAT . Esta magnitud se expresa convenientemente en términos de la altitud solar β sobre la horizontal y el azimut solar ϕ medido desde el S. La altitud solar es el ángulo entre el plano horizontal y una línea que parte desde el sol (Figura 4-3). Su valor varía entre 0° cuando el sol se encuentra sobre el horizonte y 90° cuando el sol está directamente por encima; los valores negativos corresponden a las horas nocturnas. El valor de β se determina en función de LAT y H como sigue:

$$\text{sen}\beta = \cos L \cos \delta \cos H + \text{sen}LAT \text{sen} \delta . \quad (4.30)$$

El azimut solar ϕ es el desplazamiento angular desde el sur de la proyección sobre el plano horizontal de la línea Tierra-sol. Se mide en $^\circ$ desde el punto cardinal S en el sentido de las agujas del reloj, o sea N-E-S. Por lo tanto, es positivo a las horas de la tarde y negativo a las horas de la mañana. Es dado por:

$$\cos\phi = \frac{\text{sen}L \text{sen}\beta - \text{sen}\delta}{\cos\beta \cos LAT} . \quad (4.31)$$

En forma similar, una dada superficie se define mediante su azimut γ e inclinación Σ con respecto a la horizontal (Figura 4-3). El ángulo de incidencia de los haces solares sobre una superficie es, entonces

$$\theta = \cos^{-1}(\cos\beta \cos\gamma \text{sen}\Sigma + \text{sen}\beta \cos\Sigma) \quad (4.32)$$

La dirección ψ perpendicular a la superficie se determina como $\gamma = \phi - \psi$, donde γ adopta los valores indicados en la Tabla 4.ii.

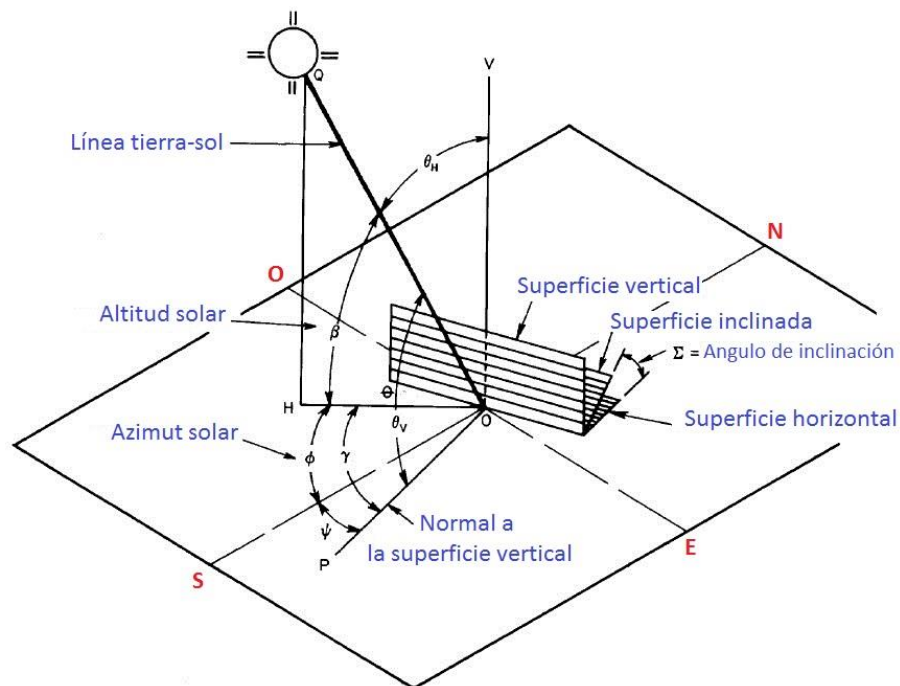


Figura 4-5: Definición de los ángulos usados en el cálculo de I_t .

Símbolo	Descripción	Valores / Ecuaciones (unidades)									
LON	Longitud	59.1°									
LAT	Latitud	−37.2°									
ρ _g	Reflectividad terrestre	0.2									
GMT	Tiempo medio de Greenwich	−03:00 h									
C _{dif}	Factor de cielo difuso	0.136 Junio , 0.073 Octubre, 0.071 Marzo									
C _n	Factor de claridad	0.8 < C _n < 1.1									
Σ	Inclinacion de la superficie	90° = vertical, 0° = horizontal									
TSA	Tiempo solar aparente	AST = LST + ET / 60 + (SLT − LON)/15 (h)									
ET	Ecuación del tiempo	ET = 229.18[0.00075 + 0.019cos(0.493d) − 0.032sen(0.493d) − 0.015cos(1.972d) − 0.041sen(1.973)] (min)									
TL	Tiempo local	0 − 24 (h)									
TLS	Tiempo local estándar	45° (GTM×15) − SLT = (LT − ET) (h)									
d	Día del año	0 − 365									
H	Ángulo horario	H = 15° (AST − 12) (°)									
δ	Declinación solar	δ = 23.45° sen[360(284+d)/365] (°)									
β	Altitud solar	β = sen ^{−1} [cosLAT cosδ cosH + senLAT senδ] (°)									
φ	Azimut solar	φ = cos ^{−1} [(senβ senLAT − senδ)/(cosβ cosLAT)] (°)									
γ	Azimuth solar-superficial	γ = φ − ψ (°)									
ψ	Azimut de la superficie considerada		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	
		ψ	180°	−135°	−90°	−45°	0°	45°	90°	135°	
θ	Ángulo de incidencia	θ = cos ^{−1} (cosβ cosγ senΣ + sinβ cosΣ) (°)									
I _n	Irradiancia normal directa	I _{dir} = C _n I _{ext} e ^{−B/sinβ} (W/m ²) I _{ext} : irradiancia solar en la capa superior de la atmosfera B: coeficiente de extinción atmosférica e ^{−B/sinβ} : atenuación por la atmósfera local									
I _{dir}	Irradiancia directa sobre una superficie	I _{dir} = I _n cosθ (W/m ²)									
Y _{dif}	Relación de cielo difuso entre una superficie vertical y una horizontal	Y _{dif} = 0.55 + 0.437cosθ + 0.313cos ² θ (W/m ²)									
I _{dif}	Irradiancia difusa sobre una superficie	I _{dif} = C _{dif} Y _{dif} I _n (W/m ²)									
I _{ref}	Irradiancia reflejada por la Tierra	I _{ref} = I _n (C + senβ)ρ _g (1 − cosΣ)/2 (W/m ²)									
I _t	Irradiancia total superficial	I _t = I _{dir} + I _{dif} + I _{ref} (W/m ²)									

Tabla 4.ii. Definiciones de los parámetros y constantes empleados en el cálculo $T_{sol-aire}$ para la ciudad de Tandil. (ASHRAE, 2009 – p. 281; Spencer, 1971)

4.3.1 Modelo de cielo claro (ASHRAE, 2009)

La radiación directa normal I_n (I_{DN} para ASHRAE) que recibe un plano localizado sobre la superficie terrestre perpendicularmente al rayo solar se calcula a partir del valor de la radiación solar fuera de la atmosfera I_{ext} (cuyo promedio es dado por la constante solar C_s) y la *constante B de atenuación solar* (definida por la ley de Beer-Lambert-Bouger) debida a la atmosfera en la forma

$$I_n = C_n I_{ext} e^{-B/\sin\beta} \quad (4.33)$$

donde $0.8 < C_n < 1.1$ es el *factor de claridad* relacionado con la humedad ambiente en el sitio de medición. Como ejemplo, los valores de I_{ext} y B en Estados unidos se presentan en la Tabla 4.iii. Para otra ubicación, estos parámetros deben ajustarse apropiadamente mediante los valores promedios medidos en las estaciones meteorológicas locales.

	I_{ext}	B	C_{dif}
Enero	1230	0.142	0.058
Febrero	1215	0.144	0.060
Marzo	1186	0.156	0.071
Abril	1136	0.180	0.097
Mayo	1104	0.196	0.121
Junio	1088	0.205	0.134
Julio	1085	0.207	0.136
Agosto	1107	0.201	0.122
Setiembre	1151	0.177	0.092
Octubre	1192	0.160	0.073
Noviembre	1221	0.149	0.063
Diciembre	1233	0.142	0.057

Tabla 4.iii: Valores de parámetros asociados con el cálculo de I_n establecidos por ASHRAE (2009) para Estados Unidos.

La inclinación de una superficie horizontal es $\Sigma = 0^\circ$ y el ángulo de incidencia θ_H de los rayos solares es el ángulo complementario de β , y no depende del azimut. Por lo tanto, $\cos\theta_H = \sin\beta$. Así, resulta:

$$I_t = I_{dir} + I_{dif} \quad (4.34)$$

$$I_{dir} = I_n \sin\beta \quad (4.35)$$

$$I_{dif} = C_{dif} Y_{dif} I_n \quad (4.36)$$

donde el factor de cielo difuso C_{dif} es una constante (Tabla 4.iii) que depende de la localización y, $Y_{dif} = 1$ en este caso. Para una superficie vertical ($\Sigma = 90^\circ$) o inclinada, debe considerarse la relación de

cielo difuso entre una superficie vertical y una horizontal dada por

$$Y_{dif} = 0.55 + 0.437 \cos \theta + 0.313 \cos^2 \theta, \quad (4.37)$$

y la radiación solar reflejada por el suelo I_{ref} :

$$I_{ref} = I_{dir} (C + \sin \beta) \rho_g (1 - \cos \Sigma) / 2 \quad (4.38)$$

donde ρ_g es la reflectividad (o albedo) del terreno que, para tierra o pasto seco, es $\rho_g \approx 0.1$. Luego, la Ec. (4.34) se transforma en

$$I_t = I_{dir} + I_{dif} + I_{ref} \quad (4.39)$$

En resumen, el modelo de cielo claro es un modelo teórico basado en las tres constantes listadas en la Tabla 4.iii y el coeficiente de claridad C_n . La Tabla 4.ii muestra los parámetros y ecuaciones involucrados en el cálculo de la correspondiente I_t para Tandil en el año 2014.

4.3.2 Modelo de Liu y Jordan (1960)

Los radiómetros de las estaciones meteorológicas miden la radiación global incidente sobre una superficie horizontal. En particular, en la Figura 4-6 la línea negra representa la evolución de $I_{med} = I_{dir}$ para la ciudad de Tandil obtenida con el radiómetro CNR2 de la estación meteorológica instalada en el campus de la UNCPBA. Si un muro se orienta hacia el N o el S, resulta $I_{dir} \neq I_{med}$ (líneas rojas y verdes en la Fig. 4-6). Además, la importancia relativa de las componentes de la radiación directa, la difusa y la reflejada por el suelo, cambia haciéndose necesario obtener no sólo el valor de la radiación global sino el de cada una de estas componentes. La forma más sencilla de estimar las componentes de la radiación a partir de los datos proporcionados por las estaciones meteorológicas consiste en aplicar el modelo de Liu y Jordan (1960) que considera isotrópica a la radiación incidente. En Argentina, los modelos anisotrópicos mostraron un mejor desempeño (Denegri et al., 2012) si bien no hay un único modelo de este tipo que se destaque.

En el modelo de Liu y Jordan (1960), la variación anual de la irradiancia solar fuera de la atmosfera se aproxima por la relación:

$$I_{ext} = C_s [1 + 0.034 \cos(360d/365)] \quad (4.40)$$

donde d es el número de día del año. Los valores obtenidos con Ec. (4.40) son similares a los mostrados en la primera columna de Tabla 4.iii. El valor de I_{ext} recibida por una superficie horizontal (para la cual $\theta_H = 90^\circ - \beta$) con respecto a la dirección de los rayos solares es:

$$I_{ext,H} = I_{ext} \cos \theta_H = I_{ext} \sin \beta. \quad (4.41)$$

El índice de claridad K se define como

$$K = \frac{I_{med}}{I_{ext,H}} \quad (4.42)$$

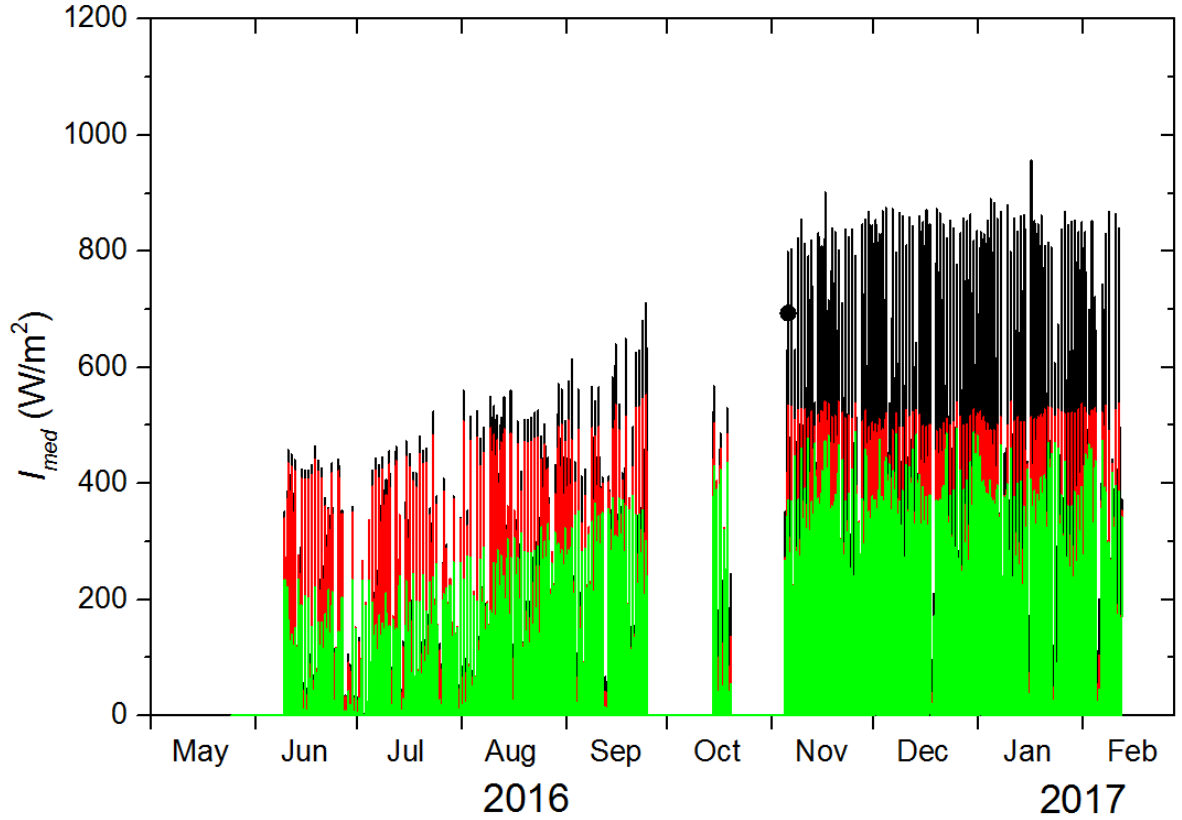


Figura 4-6: Irradiancia solar correspondiente a una superficie horizontal (línea negra) y la recibida por muros orientados al N (línea roja) y al S (verde). La falta de valores entre setiembre y noviembre de 2016 se debe a una falla del radiómetro.

con I_{med} : irradiancia solar medida en la superficie terrestre. Como los radiómetros se disponen horizontalmente, de Ec. (4.34) resulta:

$$I_{med} = I_{dir} + I_{dif} \quad (4.43)$$

y entonces:

$$1 = \frac{I_{dir}}{I_{med}} + \frac{I_{dif}}{I_{med}}. \quad (4.44)$$

Luego, se obtiene una relación entre K (Ec. 4.42) e I_{dif} de la forma:

$$\frac{I_{dif}}{I_{med}} = \begin{cases} 1 - 0.09K & K \leq 0.22 \\ 0.9511 - 0.160K + 4.388K^2 - 16.638K^3 + 12.336K^4 & 0.22 < K < 0.8 \\ 0.175 & 0.8 \leq K \end{cases} \quad (4.45)$$

Notar que la Ec. (4.45) es consistente con la radiación solar difusa que incide sobre las superficies con igual intensidad, independientemente de la ubicación del sol en el firmamento (aproximación isotrópica). Para una superficie inclinada un ángulo Σ con respecto a la horizontal y formando un ángulo θ con respecto a los haces, la Ec. (4.39) generaliza la Ec. (4.43) con:

$$I_{dir} = \frac{\cos \theta}{\sin \beta} I_{med} \quad (4.46)$$

$$I_{dif} = \frac{1 + \cos \Sigma}{2} I_{med} \quad (4.47)$$

$$I_{ref} = \rho_g \frac{1 - \cos \Sigma}{2} I_{med} \quad (4.48)$$

Notar que para los muros verticales ($\Sigma = 90^\circ$), el término de la irradiancia solar difusa (Ec. 4.47) es la mitad del correspondiente a una superficie horizontal ($\Sigma = 0^\circ$) porque el muro se encuentra expuesto a la mitad del ángulo sólido.

4.3.3 Comparación entre los modelos de cielo claro y de Liu-Jordan

En la Figura 4-7 se compara la irradiancia solar I_{med} obtenida con el radiómetro CNR2 y el valor teórico de I_{dir} determinado con las Ecs. (4.33) y (4.35) durante el periodo comprendido entre Junio 6 – 2016 y Marzo 3 – 2017. Los datos correspondientes al otoño son escasos debido a la duración del periodo de medición. En los gráficos se incluye la recta $I_{med} = 0.85 I_{dir}$ (correspondiente a $C_n = 0.85$ en Ec. 4.33) que ajusta razonablemente bien los puntos experimentales correspondientes a la máxima irradiación solar, es decir a los días claros, determinada en primavera (Fig. 4-7d) y verano (Fig. 4-7a).

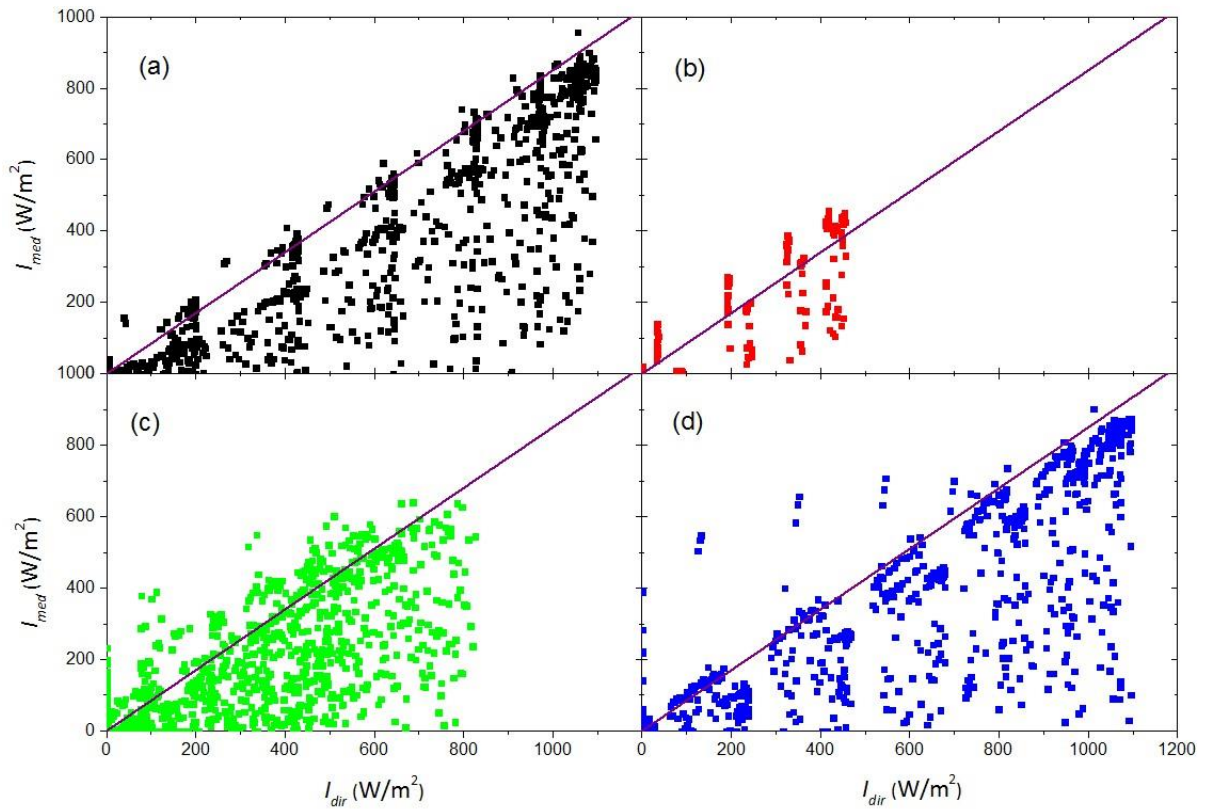


Figura 4-7: Irradiancia solar medida en Tandil en función de la irradiancia calculada con el modelo de cielo claro para verano (a), otoño (b), invierno (c) y primavera (d). Las líneas rectas se corresponden con un factor de claridad $C_n = 0.85$.

Observar que los valores medidos en otoño (Fig. 4-7b) e invierno (Fig. 4-7c) caen por encima de dicha recta pero sobre esto se volverá más adelante. Los valores de $I_{med} < I_{dir}$ se explican por la presencia de nubosidad que reduce I_{dir} respecto a la de un día claro. La Fig. 4-7 muestra, en general, pocos días con cielo claro, especialmente en invierno, implicando que el cálculo de la irradiancia con el modelo de cielo claro puede dar lugar a errores significativos en los valores de la irradiancia que efectivamente incide sobre una construcción.

La Figura 4-8 muestra la evolución del factor de claridad obtenido con la Ec. (4.42). Se observa que las mediciones realizadas en otoño e invierno alcanzan $K \approx 0.8$, y un buen número de veces es $K > 1$ (cuando el máximo de K debe ser 1) hasta la falla de la estación meteorológica (que ocurre a fines de septiembre). Luego de reparada (noviembre), se obtiene $K < 0.7$ y menos valores que superan el máximo. Como el error que afecta I_{ext} es despreciable, de la Fig. 4-8 se infiere que el radiómetro funcionó mejor a partir de noviembre, y por tanto las mediciones de otoño e invierno deben usarse con prudencia. Esto explica las discrepancias encontradas en las Figs. 4-7(b) y 4-7(c) con respecto a los valores proporcionados por el modelo de cielo claro.

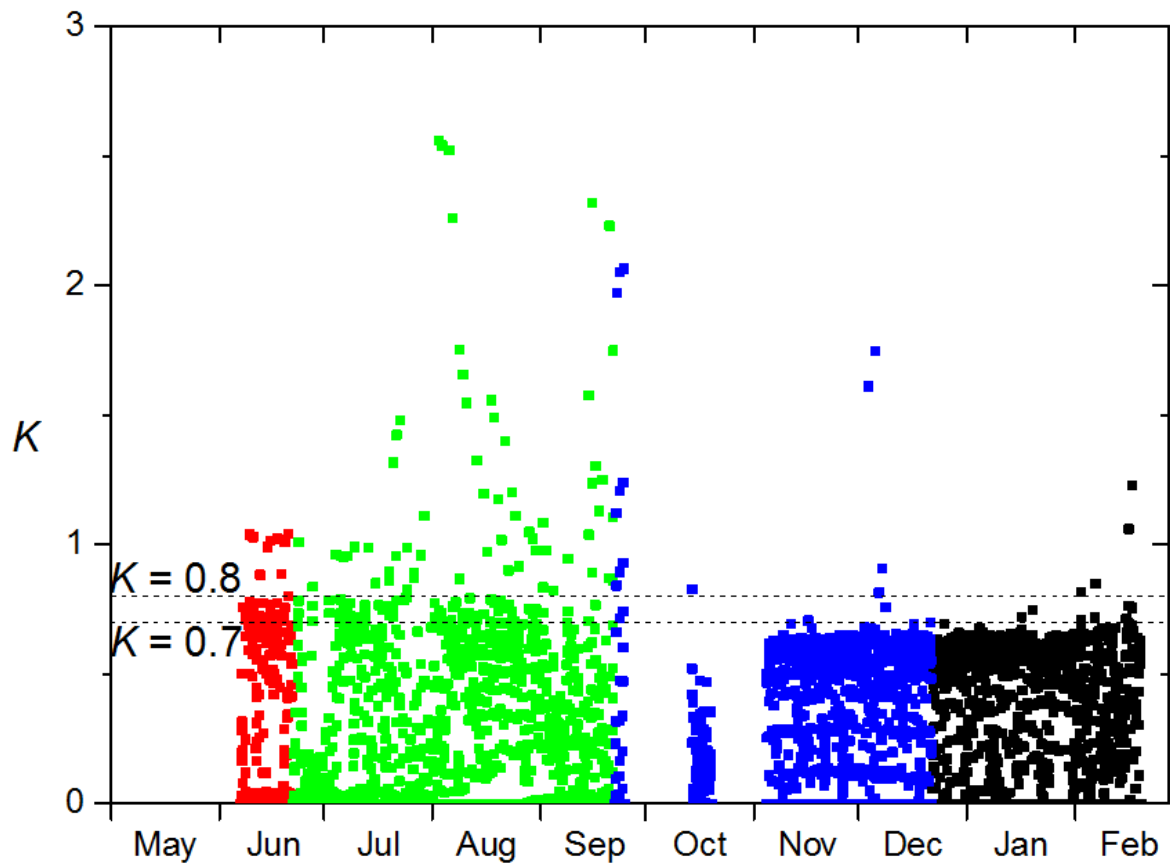


Figura 4-8: Factor de claridad obtenido a partir de las medidas disponibles para el verano (negro), el otoño (rojo), el invierno (verde) y la primavera (azul). Las fechas para las que no hay valores disponibles corresponden a los días en los que el equipo falló.

La Figura 4-9 muestra K en función de la hora del día en las diferentes estaciones del año. Se observan errores significativos, especialmente en los valores que corresponden al amanecer y al atardecer. Esto se debe a que el cálculo del ángulo de incidencia es crítico cuando los rayos solares son rasantes a la superficie terrestre. En estos casos, los pequeños errores que afectan el cálculo del tiempo solar y del azimut ocasionan errores significativos en el cálculo de $I_{ext,H}$ con la Ec. 4-41.

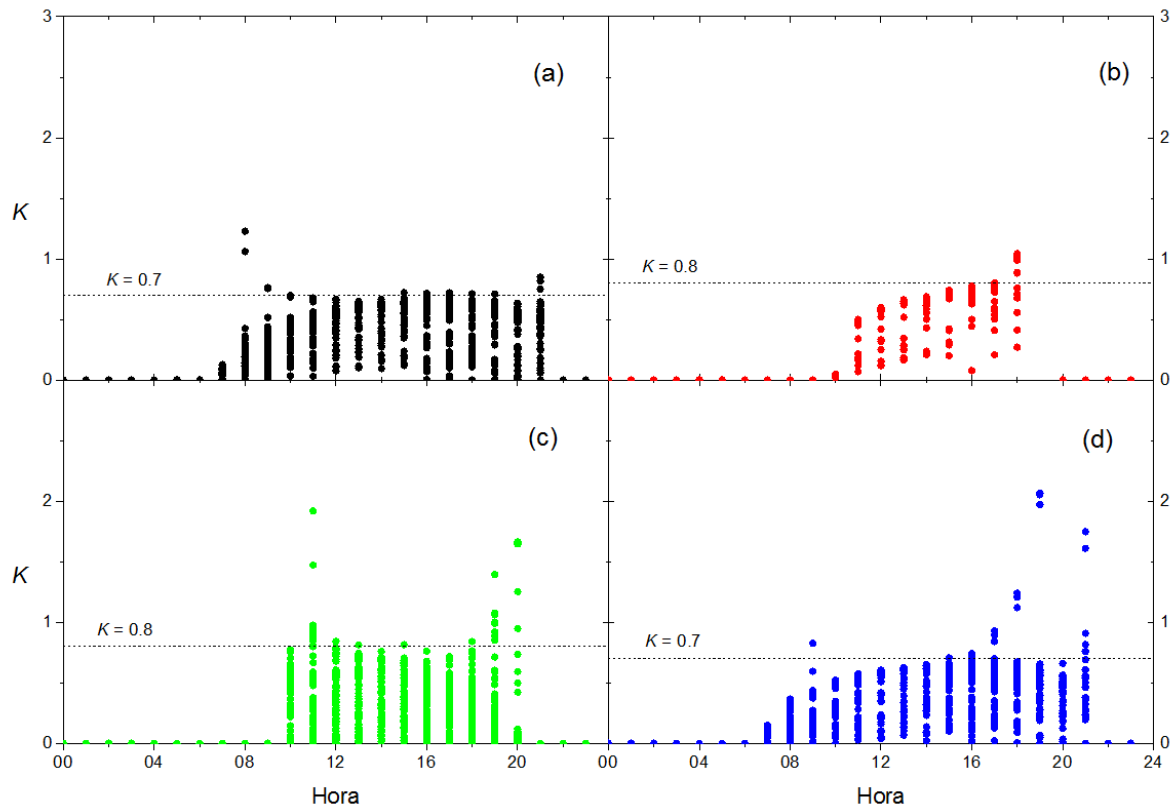


Figura 4-9: Factor de claridad en función de la hora del día en verano (a), otoño (b), invierno (c) y primavera (d).

Para salvar los inconvenientes mencionados, se adimensionaliza K (Ec. 4.42) con el valor que se alcanza en los días claros (0.7 para primavera y verano, 0.8 para invierno y otoño, Fig. 4-8). Además, se consideran sólo los valores de K correspondientes al mediodía (entre las horas 12:00 y 14:00), cuando los errores debido al ángulo de incidencia de los rayos solares son menores. Con estos ajustes, $K \approx 1$ en días claros observándose una menor dispersión de los valores resultantes. A continuación K se relaciona con la nubosidad en el momento de medición.

El SMN reporta la nubosidad estimada a partir de la fracción del cielo cubierto por nubes determinada por un observador. Los índices de nubosidad del cielo son proporcionados en forma ambigua describiéndose el cielo, por ejemplo, como “ligeramente nublado” o “muy nublado”. En un intento por aprovechar esta información, a la nubosidad reportada por el SMN se le asigna el índice de nubosidad $0 \leq nu \leq 10$ como se muestra en la Tabla 4.iv. La Figura 4-10 muestra que K se reduce al

aumentar nu así definido, aunque se tiene una gran dispersión de los puntos. La línea parabólica que mejor los ajusta, considerando $K = 1$ para $nu = 0$, es

$$K(nu) = 1 - 0.02nu - 0.005nu^2 \tag{4.49}$$

No obstante, la dispersión encontrada implica que nu no es un parámetro confiable por lo que debería determinarse con algún instrumento calibrado.

Descripción del SMN	Fracción cubierta del cielo (SMN)	Índice de nubosidad, nu
Despejado	0	0
Algo nublado	1/8 - 3/8	2.5
Parcialmente nublado	4/8 - 5/8	5
Nublado	6/8 - 7/8	7.5
Cubierto	8/8	10

Tabla 4.iv: Índice de nubosidad.

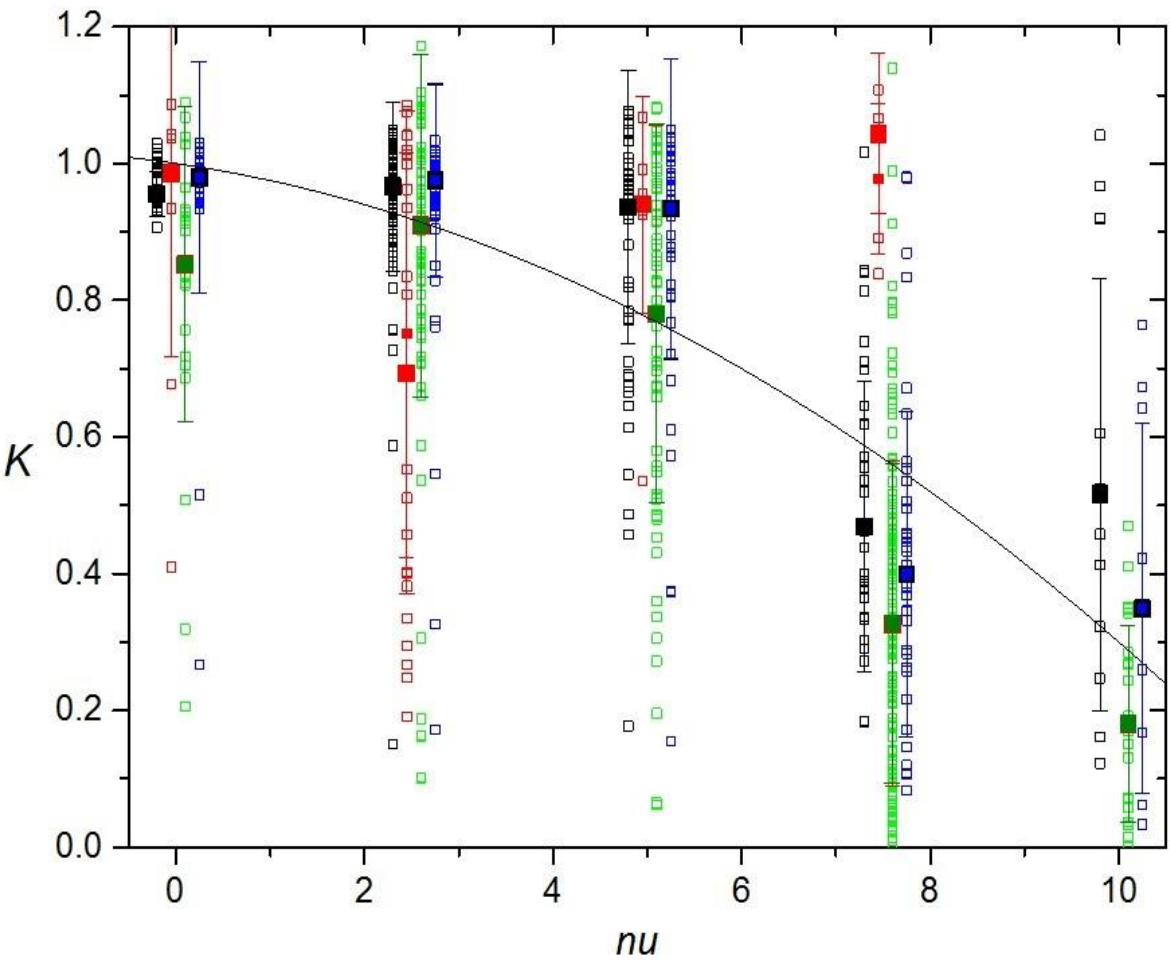


Figura 4-11: índice de claridad en función del índice de nubosidad.

4.4 Cálculo de la temperatura sol-aire

En el cálculo del flujo de calor por conducción a través de la envolvente edilicia deben considerarse los efectos de la radiación solar incidente y de las resistencias superficiales puesto que la envolvente captura parcialmente energía del sol e intercambia energía con el ambiente a través de las capas de aire próximas a las superficies. Por lo tanto, el cálculo teórico de la temperatura superficial externa T_{se} de la pared requiere conocer los valores de T_e y de la irradiancia solar total I_t . Estos dos parámetros pueden relacionarse usando la ecuación de Boltzman (como lo hicieron, por ejemplo, Albatici y Tonelli, 2010; Evangelisti et al., 2017; O'Grady et al., 2017; Tejedor et al., 2017) o la temperatura equivalente sol-aire $T_{sol-aire}$ definida en §2.3 (como lo hicieron, por ejemplo, O'Callaghan y Probert, 1977; Peng y Wu, 2008). En este último caso, la diferencia de temperatura entre ambos lados de la capa límite de aire exterior, $T_{sol-aire} - T_{se}$, se relaciona con R_{se} y el flujo de calor q_e que atraviesa esta capa límite en el instante t de la siguiente forma:

$$q_e(t) = \frac{1}{R_{se}} [T_{sol-aire}(t) - T_{se}(t)] \quad (4.50)$$

De acuerdo a la Ec. (4.50), $T_{sol-aire} - T_{se}$ puede ser importante para q_e grande, aun cuando R_{se} se suponga constante, y también puede cambiar su signo según la pared reciba ($q_e > 0$) o disipe ($q_e < 0$) calor. Como se describió en §4.2.4, el valor de q_e se determina considerando la evolución de las temperaturas T_i y T_e reales y de la irradiancia I_t mediante la relación:

$$T_{sol-aire} = T_e + \frac{\alpha I_t}{h_e} \quad (2.1)$$

La cantidad I_t recibida por un muro dado se obtiene con la suma de las contribuciones directa, difusa y reflejada (Ec. 4.39), determinadas a partir del modelo de cielo claro (§4.3.1) o bien por el modelo de Liu-Jordan (§4.3.2).

4.4.1 Evolución del flujo de calor y de la temperatura en el interior de un muro considerando la radiación solar directa incidente

Tanto T_e como I_t presentan variaciones a lo largo del día que afectan T_{se} de acuerdo a la Ec. (2.1). Las soluciones analíticas de la ecuación del calor obtenidas por el método de la admitancia son válidas en el caso de variaciones sinusoidales de las temperaturas interna y externa. Cuando estas variaciones no son sinusoidales, el procedimiento más simple consiste en resolver numéricamente la ecuación del calor (4.10) para lo cual existen varias formas, siendo el método de diferencias finitas el tradicionalmente empleado (Hazewinkel, 2001). Para aplicar este método, consideremos un muro de espesor ℓ dividido en N capas de espesor Δx como ilustra la Figura 4-11 (Thomas et al., 2018a; Marino et al., 2018). Definimos las temperaturas T_j en las $N+1$ interfaces entre capas sucesivas, y las

propiedades del material k_j , C_{pj} y ρ_j en el centro de cada capa. En diferencias finitas, la derivada espacial de la Ec. (4.7) centrada en la interface j con $2 \leq j \leq N$, toma la forma

$$\left. \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \right|_j = \frac{1}{(\Delta x)^2} \{ k_j T_{j+1} - (k_j + k_{j-1}) T_j + k_{j-1} T_{j-1} \}, \quad (4.51)$$

mientras la derivada temporal es

$$\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_j = \frac{1}{\Delta t} [T_j(t + \Delta t) - T_j(t)] \quad (4.52)$$

Por lo tanto, luego de un paso temporal Δt desde el tiempo t , la temperatura es

$$T_j(t + \Delta t) = T_j(t) + \frac{2\Delta t}{(\rho C_p|_j + \rho C_p|_{j+1})(\Delta x)^2} [k_j T_{j+1} - (k_j + k_{j-1}) T_j + k_{j-1} T_{j-1}] \quad (4.53)$$

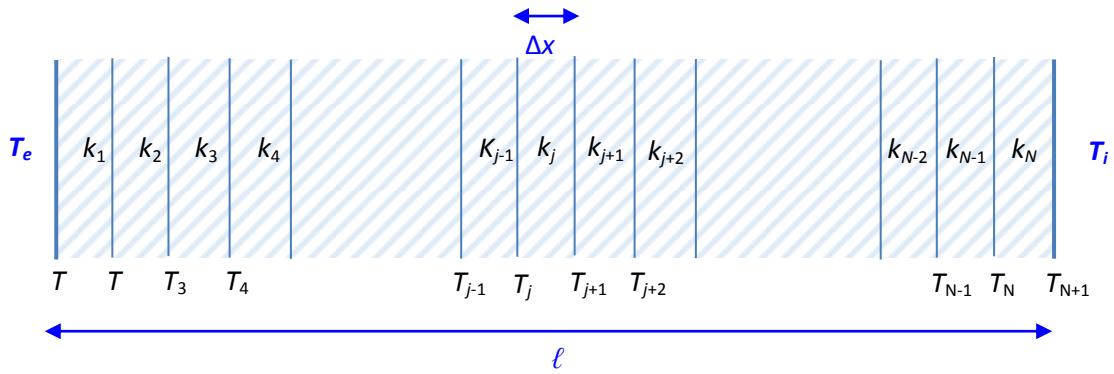


Figura 4-11: Corte esquemático de un muro fraccionado en N capas de espesor Δx .

Obtenida la distribución de temperatura en un dado tiempo, el flujo de calor se calcula con la aproximación discreta explícita de la Ec. (4.6):

$$q_j = -\frac{k_j}{\Delta x} (T_{j+1} - T_j) \quad (4.54)$$

En el caso de elegir el esquema explícito (4.52) para calcular la derivada temporal, el paso temporal debe cumplir una condición equivalente a la de Courant (Sandrolini y Franzoni, 2006) para que el esquema numérico sea estable:

$$\Delta t \leq C_d \frac{(\Delta x)^2}{k / \rho C_p|_{\min}}, \quad (4.55)$$

donde la constante $C_d < 0.5$ (conocida también como *número de difusión*) y *min* indica el menor de los valores de toda la grilla. Existen varios métodos alternativos de evitar la condición (4.55); entre ellos se encuentran los esquemas de resolución implícitos de la derivada temporal y el de Crank-Nicolson (Thomas, 1995).

Las CC establecen las temperaturas externa T_e e interna T_i considerando las resistencias térmicas superficiales externa R_{se} e interna R_{si} . Notar que el efecto de la radiación solar sobre la superficie del muro puede considerarse también mediante el empleo de $T_{sol-aire}$ en lugar de T_e . El flujo q_e a través de la capa de aire externa, entre el exterior a temperatura $T_{sol-aire}(t)$ y la superficie externa de la envolvente a temperatura $T_{se}(t) = T_1(t)$ es proporcionada por la Ec. (4.50). Si no hay pérdidas por radiación resulta que $q_e = q_1$, el flujo de calor en la primera capa, y entonces

$$q_e = \frac{1}{R_{se}} [T_{sol-aire} - T_1] = q_1 = \frac{k_1}{\Delta x} [T_1 - T_2], \quad (4.56)$$

de modo que

$$T_1(t) = \frac{T_2(t) + \frac{\Delta x}{k_1 R_{se}} T_e(t)}{1 + \frac{\Delta x}{k_1 R_{se}}}. \quad (4.57)$$

En forma similar, el flujo q_i a través de la capa de aire interna localizada entre el interior a temperatura $T_i(t)$ y la superficie interna de la pared a temperatura $T_{si}(t) = T_{N+1}(t)$ es

$$q_i(t) = \frac{1}{R_{si}} [T_{N+1}(t) - T_i(t)] = q_N = \frac{k_N}{\Delta x} [T_{N+1}(t) - T_N(t)], \quad (4.58)$$

de modo que

$$T_{N+1}(t) = \frac{T_N(t) + \frac{\Delta x}{K_N R_{si}} T_i(t)}{1 + \frac{\Delta x}{K_N R_{si}}}. \quad (4.59)$$

En resumen, la pared considerada compuesta de N capas de distintos materiales con propiedades k_j , C_{pj} y ρ_j ($j = 1, 2, \dots, N$) se encuentra bajo las CC externa $T_{sol-aire}(t)$ e interna $T_i(t)$ más allá de las capas límites de aire. Se comienza introduciendo las condiciones iniciales (CI) $T_j(t=0)$ para todo j . Luego se calcula T_j en el tiempo Δt con Ec. (4.53) desde $j = 2$ hasta $j = N$, y T_1 y T_{N+1} con Ecs. (4.57) y (4.59); este cálculo se realiza para todo $0 < t < t_{fin}$ en M pasos temporales. Posteriormente, los valores de las temperaturas en todos los nodos y tiempos se calculan repetidamente hasta que converjan a valores que difieren en una cantidad (error) pequeña entre una iteración y la siguiente. Si se cumple la condición de Courant dada por Ec. (4.55) para el Δt elegido, el cálculo necesita sólo un par de iteraciones para que los resultados numéricos converjan a la solución.

La Ec. (4.10) es parabólica y debe resolverse simultáneamente en todo el dominio (i.e., a todo lo ancho del muro) y en el intervalo temporal $0 < t < t_{fin}$, sujetas a las CC (4.50) y (4.58) (Hazewinkel, 2001). Las CI afectan la solución en todo el intervalo de cálculo. En el caso de variaciones temporales periódicas, el efecto de una CI arbitraria sobre la solución puede despreciarse si se consideran los resultados encontrados después de transcurridos algunos días a partir del tiempo establecido en la

CI, como se hace en §5.3. Una vez obtenida la solución $T(x,t)$ en un cierto dominio mediante la Ec. (4.53), $q(x,t)$ se calcula con la Ec. (4.6). Conocidas las variables T y q , es posible estimar los parámetros característicos del muro que se definen a continuación considerando T_i constante y $T_{sol-aire} = T_{e0}e^{-i\omega t}$ variando sinusoidalmente a lo largo del día. La admitancia (Ec. 4.28), o capacidad de intercambio de calor con el medio ambiente con $T_i = \text{const}$, se calcula a partir de los resultados numéricos como:

$$Y_e = \frac{q_{e0}}{T_{e0}} \cos(\varphi_Y), \quad (4.60)$$

donde T_{e0} es la amplitud impuesta de la variación de la temperatura externa, mientras que los resultados numéricos proporcionan q_{e0} y φ_Y : retraso entre la evolución de la temperatura y la del flujo de calor sobre la cara exterior. De forma análoga, la transmitancia dinámica (Ec. 4.29) se calcula a partir de los resultados de la simulación como

$$u = \frac{q_{i0}}{T_{e0}} \cos \varphi, \quad (4.61)$$

donde φ es el retraso entre q_{i0} y T_{e0} . Por otra parte, el factor de decremento

$$f = \frac{u}{U} = \frac{q_{i0}}{q_{ss}}, \quad (4.62)$$

proporciona un valor indicativo de la amortiguación de las variaciones periódicas del flujo de calor respecto del calculado con la transmitancia térmica $U = 1/R_T$ del muro cuando se calcula el flujo de calor q_{ss} por unidad de área en régimen estacionario.

4.4.2 Modelo conceptual del intercambio radiativo nocturno

Como ya se dijo, es importante considerar la radiación solar porque puede elevar varios °C la temperatura de la envolvente a lo largo del día. En el hemisferio sur, las superficies orientadas al N reciben la mayor cantidad de radiación directa mientras aquellas con orientación al S reciben más bien radiación difusa y reflejada por el ambiente. También debe tenerse en cuenta que la radiación difusa recibida por una pared vertical (independientemente de la orientación) es aproximadamente la mitad de la que recibe una superficie horizontal por encontrarse expuesta a sólo la mitad del arco que recorre el sol diariamente. El enfriamiento debido a la emisión de radiación IR y convección durante la noche es otro factor a considerar. En esta sección se implementa un modelo de enfriamiento nocturno basado en el cálculo de la energía almacenada por los muros durante el día. En primer lugar, se obtiene $T_{sol-aire}$ de los muros del edificio evaluado orientados al S, y luego se comparan los resultados con los valores determinados aplicando el modelo de Liu-Jordan y con las mediciones termográficas de T_{se} (§5.4.3). En §6, el enfriamiento nocturno determinado a partir de este modelado analítico se compara con los resultados del modelado numérico.

La radiación solar I_t que incide sobre un dado cuerpo normalmente predomina sobre la radiación emitida por los objetos cercanos. Cuando una pared no recibe radiación solar (ya sea en forma directa, difusa y/o reflejada) como sucede, por ejemplo, durante la noche, surge la necesidad de considerar el intercambio radiativo de la pared con los objetos circundantes y el firmamento. En este caso, hacemos el análisis siguiente. La radiación térmica emitida por una superficie es función de su temperatura. La ley de Stefan–Boltzman establece que la energía radiante hemisférica total de un cuerpo negro, por unidad de tiempo y de área, es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo. En consecuencia, la energía radiante hemisférica total para los cuerpos grises es $I_r = \varepsilon \sigma T^4$, siendo $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ la constante de Stefan-Boltzmann y ε la emisividad del cuerpo a temperatura T (K). Cuando el cuerpo se encuentra a temperatura ambiente, los efectos de la radiación suelen despreciarse debido a que el valor de σ es pequeño. En efecto, la potencia emisiva total de un cuerpo negro ($\varepsilon = 1$) a 300 K es de unos 460 W/m².

Cuando un objeto, cuya temperatura superficial es T_{s1} , intercambia una cantidad de calor con las paredes de un recinto que se encuentran a la temperatura T_{s2} , también absorbe una cantidad de la radiación emitida por su entorno que es proporcionada por la ley de Stefan–Boltzman. La transferencia de energía neta por unidad de área y tiempo es

$$q_R = \sigma (\varepsilon_1 T_{s1}^4 - \varepsilon_2 T_{s2}^4) \quad (4.63)$$

donde $\varepsilon_{1,2}$ es la emisividad IR del cuerpo y del recinto respectivamente. En la práctica, una dada superficie no se encuentra rodeada por un único cuerpo y, por lo tanto, es necesario incluir en los cálculos un *factor de visión* o de forma $0 < F < 1$ que depende del ángulo sólido con el que una superficie es vista desde otra superficie. Si ninguno de los dos cuerpos es un radiador perfecto, pero existe entre los mismos una relación geométrica, la energía radiante neta transferida entre ellos se asocia a un factor de forma complejo que depende de la emisividad y geometría de los cuerpos (Fernández Díez, 1992).

En particular, la superficie de área A_1 de un muro vertical irradia una cantidad de energía hacia los cuerpos circundantes a temperatura T_e y al cielo nocturno que se aproxima por

$$q_R = \sigma \varepsilon_1 (T_{se}^4 - F_{1c} T_c^4 - F_{1e} T_e^4), \quad (4.64)$$

si todos los cuerpos tienen aproximadamente el mismo valor de ε , donde T_c es la temperatura efectiva del cielo (Clark, 1981; Berger et al., 1984). Además, si alrededor de la mitad de la radiación recibida corresponde al cielo y la otra mitad a los objetos vecinos, se tiene que $F_{1c} \approx F_{1e} \approx 1/2$. Por su parte, se adopta la aproximación

$$T_c(t) = \varepsilon_c^{0.25} T_e(t) \quad (4.65)$$

donde

$$\varepsilon_c(t) = 0.787 + 0.003 T_r(t) \quad (4.66)$$

es la emisividad del cielo y

$$T_r(t) = T_e(t) + 35 \log(HR/100) \quad (4.67)$$

es la temperatura del rocío y HR es la humedad relativa. En definitiva, T_c es una función del tiempo a través de $T_e(t)$ y $HR(t)$. En consecuencia, durante las noches existe un enfriamiento que se calcula con la Ec. (4.64) además del flujo convectivo:

$$q_e = h_c(T_{se} - T_e). \quad (4.68)$$

donde h_c (W/m²°C) es el coeficiente de transferencia de calor por convección que depende del viento en la forma (ASHRAE, 1997)]:

$$h_c = 5.62 + 3.9V \quad (4.69a)$$

para superficies planas verticales, aire a temperatura ambiente y $V < 5$ m/s. La norma británica CIBSE *Guide A* (2006) adopta la expresión:

$$h_c = 4.0 + 4.0V \quad (4.69b)$$

para $V > 1$ m/s.

Las expresiones (4.68) y (4.69) son aproximaciones sencillas. Para intensidades del viento mayores, la transferencia de calor por convección es más compleja y debe distinguirse si las superficies están dirigidas a sotavento o barlovento, y considerarse la diferencia de temperatura entre la superficie y el aire (CIBSE *Guide C*, 2001; Palyvos, 2008; Defraeye et al., 2011; Awbi y Hatton, 1999).

El calor entregado disminuye la temperatura $T \approx T_{se}$ del cuerpo de masa m_1 , área A_1 y calor específico C_p de acuerdo a

$$q_R + q_e = -\frac{m_1}{A_1} C_p \frac{dT_{se}}{dt}. \quad (4.70)$$

Reemplazando (4.64) y (4.68) en (4.70), se obtiene:

$$\frac{dT_{se}}{dt} = -\frac{\sigma \varepsilon_1 A_1}{m_1 C_p} (T_{se}^4 - F_{1c} T_c^4 - F_{1e} T_e^4) - h_c (T_{se} - T_e) \quad (4.71)$$

La Ec. (4.71) es una ecuación diferencial ordinaria no lineal de T_{se} en función del tiempo a través de $T_e(t)$ y $HR(t)$ con dos tiempos característicos del muro: uno relacionado con la transferencia por radiación $m_1 C_p / \sigma \varepsilon_1 A_1 T_{se}^3$, y otro relacionado con la disipación por convección $1/h_c$, y los factores de forma F_{1c} , F_{1e} . La Ec. (4.71) puede resolverse fácilmente en forma numérica recurriendo, por ejemplo, al método de diferencias finitas.

4.5 Transferencia de calor global: Método inverso

En §4.1 y §4.2 se analizó el comportamiento térmico de una parte específica de la envolvente

(como, por ejemplo, los muros) puesto que, conociendo cómo se comporta cada componente constructivo del edificio, es posible determinar su comportamiento global (esto representa la resolución del *problema directo*). No obstante, como se adelantó en §2.2, también puede aplicarse la resolución del problema inverso para caracterizar térmicamente el edificio en conjunto como sigue. (Muñoz et al., 2014)

El edificio se considera como un espacio que contiene aire y elementos a temperatura uniforme T_i que varía con el tiempo. En el exterior, la temperatura ambiente T_e también varía con el tiempo. Como $T_e \neq T_i$, en general, se produce un intercambio de calor por conducción a través de la envolvente. Si el espesor de ésta es mucho menor que la dimensión característica del edificio, el flujo de calor dentro de las paredes puede suponerse unidimensional y perpendicular a sus superficies. Por su parte, para cada tipo de superficie de la envolvente, el flujo estacionario de energía por unidad de área a través del material, q_e , es proporcionado por la Ec. (4.1).

Otro factor a considerar es la inercia térmica en las paredes que produce una amortiguación de los cambios externos de temperatura y un retardo temporal φ entre los máximos de T_e y T_i como se explica en §4.2.5. Además, durante los periodos estivales se observan fuertes fluctuaciones de los parámetros meteorológicos con respecto a los valores medios normales para esta estación. La Figura 4-12a, donde se representa la evolución temporal de T_i en los niveles de PB y PA, y T_e durante el verano 2013-2014, muestra que las notorias variaciones externas no se reflejan en el interior. Entre los días 1 y 4 de enero de 2014 y entre el 22 y 26 del mismo mes se registraron bajas pronunciadas de T_e que tardaron en manifestarse internamente como puede observarse en la ampliación de las curvas para un corto periodo mostrada en la Figura 4-12b. El pequeño desfase entre $T_e(t)$ y $T_i(t)$ observado en Figura 4-1 es otra peculiaridad del edificio estudiado. Estas características surgen del análisis de la respuesta dinámica del edificio completo, es decir de analizar los efectos combinados del comportamiento térmico de muros y superficies vidriadas. Los resultados asociados con la respuesta dinámica del edificio y el desfase se presentan en §5.1.3 y §5.2, respectivamente.

Por otra parte, la radiación solar que ingresa a través de las superficies vidriadas es atrapada en el interior por efecto invernadero. Además, la radiación solar eleva la temperatura de las fachadas (incrementando, en consecuencia, el flujo de calor por conducción) en una magnitud superior a la diferencia ΔT . La ecuación para calcular el flujo de calor a través de los cerramientos vidriados requiere, como datos de partida, la radiación neta incidente, el ángulo de incidencia y el coeficiente de absorción de la radiación solar de la superficie externa expuesta, entre otros (Duffie y Beckman, 1991). El viento actúa sobre la capa límite superficial y aumenta la disipación de energía en la envolvente. También aumenta la diferencia de presión entre el exterior y el interior, aumentando la renovación del aire a través de las aberturas o la infiltración por las rendijas de puertas y ventanas. Estos efectos dependen del tipo de superficie, el área expuesta, el ángulo entre cada fachada y la dirección del viento, las características aerodinámicas y los obstáculos cercanos (otros edificios,

árboles, vehículos, etc.) interpuestos al viento, la ΔT , la humedad del aire, etc. El caudal de renovación, además, depende de la permeabilidad de las carpinterías para una determinada diferencia de presión entre el exterior y el interior (Volantino y Cornejo Siles, 2007).

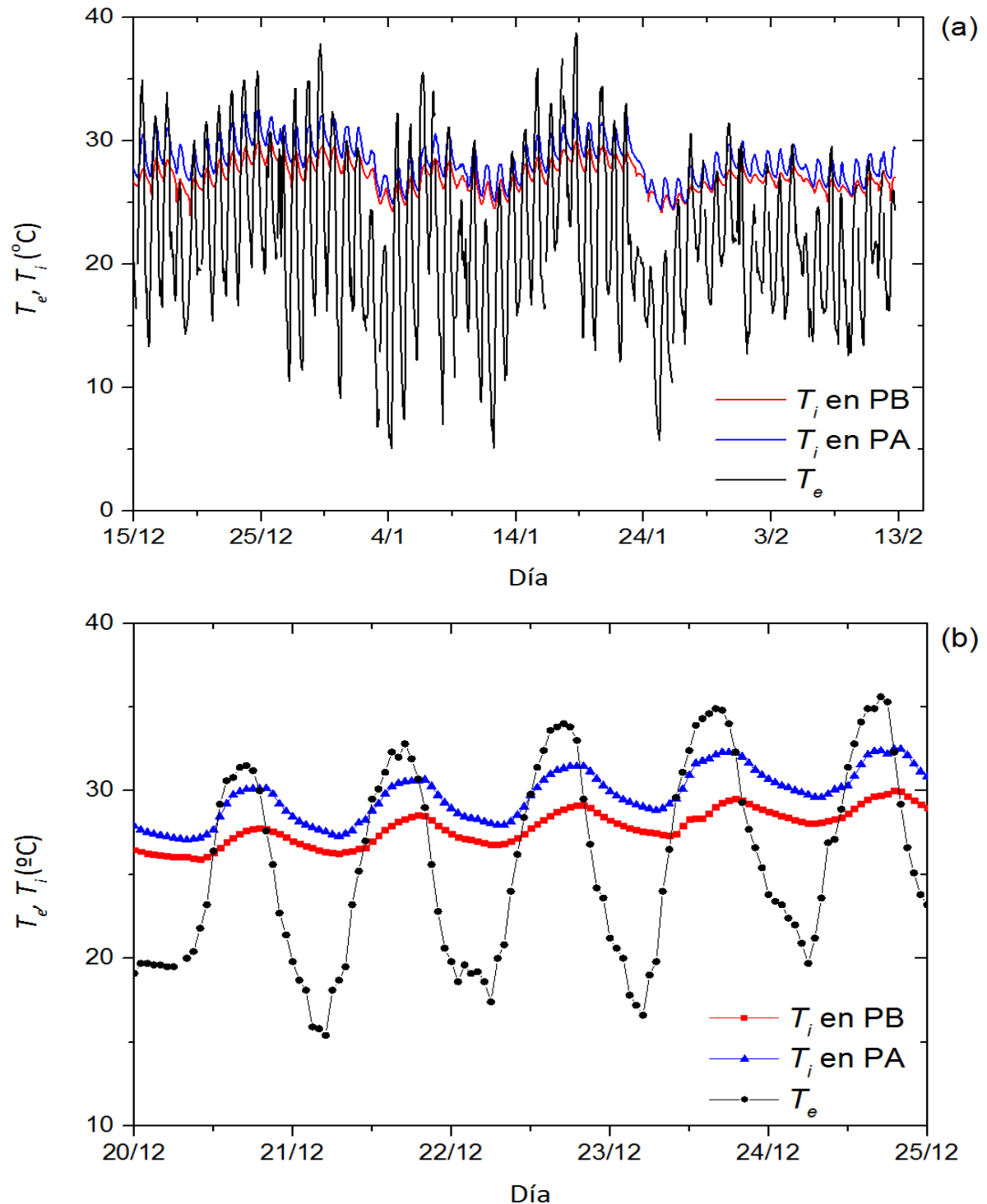


Figura 4-12: (a) Evolución de las temperaturas externas e internas durante 60 días del verano 2013-2014, y (b) Detalle de la evolución de las temperaturas.

Para superar la complejidad de los cálculos implicada por los efectos de la radiación solar y la acción del viento, se recurre a la hipótesis por la cual ambos efectos generan un flujo de calor hacia

el interior que es proporcional, en primera aproximación, a la intensidad I_t de la radiación incidente y a la intensidad del viento v (De Paul 2006), respectivamente. Sumando, además, el término d asociado con el aumento de temperatura debido a la presencia de fuentes internas de calor, se obtiene la siguiente ecuación diferencial simple:

$$\frac{dT_i}{dt} = aI_t + b(T_e - T_i) + c_1v + d \quad (4.72)$$

o

$$\frac{dT_i}{dt} = a(T_e - T_i) + bI_t + c_2v(T_e - T_i) + d \quad (4.73)$$

donde a ($m^2C s^{-1}W^{-1}$) se relaciona con la captación solar media del edificio, $b = 1/\chi(s^{-1})$, c_1 ($^{\circ}C m^{-1}$) y c_2 (m^{-1}) se relacionan con el efecto convectivo del viento y de las infiltraciones, y d ($^{\circ}C s^{-1}$) con la generación interna promedio. Además,

$$\chi = \frac{m_T C_{pT}}{U_T}, \quad (4.74)$$

donde $m_T C_{pT} = \sum_j m_j C_{pj}$ es la suma del producto de la masa por el calor específico de los j elementos que se encuentran en el interior del edificio, capacidad calorífica o masa térmica global del edificio. Por su parte $U_T = \sum_j A_j U_j$ es la transmitancia térmica global del edificio.

La Ec. (4.73) solo difiere de (4.72) en el término que describe la acción del viento en cuyo caso la corrección del flujo de calor asociado (disipado o entregado) también depende de la diferencia entre la temperatura interna y externa del edificio como los experimentos de laboratorio sugieren (Díaz y Barreneche, 2005). Los coeficientes a , b , c , d no dependen de ΔT , de la radiación ni de la velocidad del viento, pero si obedecen a otros factores tales como el ángulo de inclinación del sol a mediodía, características aerodinámicas, etc. aunque para el edificio evaluado no se encontraron dependencias significativas de estos. Otro fenómeno a considerar es el enfriamiento nocturno por radiación (§4.4.2), que produce una disminución adicional de la temperatura.

Empleando r conjuntos de datos de las variables medidas en el mismo tiempo t_r en el edificio evaluado, se desea encontrar la regresión lineal de $\left. \frac{dT_i}{dt} \right|_r$ a partir de los datos, con respecto a la variable que aparece en el primer término del miembro derecho de (4.73), o sea I_t . La pendiente de la recta que mejor ajusta los datos experimentales es el valor del coeficiente a . Luego se realiza la regresión lineal de $\left. \frac{dT_i}{dt} - aI_t \right|_r$ en función de la segunda variable, ΔT , para encontrar b , y así sucesivamente. Los coeficientes así hallados dan una aproximación al valor medido de $\left. \frac{dT_i}{dt} \right|_r$ con el siguiente error:

$$e_{cm,r} = \left. \frac{dT_i}{dt} \right|_r - (aI_t + b\Delta T + c_1v + d) \Big|_r \quad (4.75)$$

siendo H la humedad absoluta.

Luego, las Ecs. (4.72) o (4.73) posibilitan valorar la contribución de cada proceso de transmisión del calor (conducción, convección, radiación) en forma independiente. La integración se basa en el principio de superposición, según el cual el flujo de calor total se determina sumando los flujos de calor para cada proceso de intercambio. El resultado no depende del orden si todos los procesos físicos asociados son completamente independientes entre sí. Por el contrario, y como ocurre en realidad, si los procesos no fuesen independientes en alguna medida, las variables resultan dependientes una de otra y entonces, el resultado depende del orden en el que se realiza el ajuste de los coeficientes. Además, el método no permite analizar todos los procesos físicos simultáneamente, ya que previamente debe establecerse un orden para el análisis. Una mala elección de este orden puede dar lugar a resultados erróneos. Esta restricción se corrige recurriendo al modelo de regresión múltiple que se presenta a continuación. La hipótesis básica en la que se sustenta este modelo es que cada una de estas variables da cuenta de un proceso físico lineal, en primera aproximación.

4.5.1 Modelo de Regresión Lineal Múltiple (MRLM)

El MRLM permite relacionar linealmente un conjunto de datos con varias variables simultáneamente. Los valores de temperatura y humedad medidos en el interior, más los proporcionados por las estaciones meteorológicas conforman una serie de n conjuntos de datos para un mismo tiempo. Si la variable dependiente $\frac{dT_i}{dt}$ es una función lineal de las variables independientes (I_t , ΔT , v , y ΔH), y e es el error o perturbación aleatoria, el resultado de $r = 1, 2, \dots, n$ mediciones puede expresarse como

$$\begin{bmatrix} \left. \frac{dT_i}{dt} \right|_1 \\ \vdots \\ \left. \frac{dT_i}{dt} \right|_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & I_{t_1} & (T_e - T_i)_1 & v_1 & (H_e - H_i)_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & I_{t_n} & (T_e - T_i)_n & v_n & (H_e - H_i)_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{RLM} \\ a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{cm,1} \\ \vdots \\ e_{cm,n} \end{bmatrix}. \quad (4.76)$$

En notación matricial, (4.76) se representa como

$$O = WB + E \quad (4.77)$$

donde O , B , E son los vectores de la variable dependiente, de los coeficientes y de los residuos, respectivamente, mientras W es la matriz de datos. El MRLM consiste en encontrar los parámetros a , b , c , d , f que minimizan la suma S de los e_{cm} de todos los datos. Por comodidad definimos el vector asociado $\hat{O} = WB$ derivado del modelo, y sus elementos \hat{o}_r . Así, la diferencia entre los valores observados O y los valores estimados \hat{O} es el vector residuo $E = (O - \hat{O}) = (O - WB)$. El mínimo de la función escalar

$$\Lambda(B) = E^T E = (O - WB)^T (O - WB) \quad (4.78)$$

se encuentra derivándola e igualándola a cero:

$$\frac{d}{dB} \Lambda(B) = \frac{d}{dB} (O - WB)^T (O - WB) = -2W^T O + 2W^T WB = 0 \quad (4.79)$$

donde el supraíndice T representa la matriz transpuesta. Despejando, se obtiene:

$$W^T O = W^T WB \quad (4.80)$$

Si $W^T W$ es una matriz no singular, es decir que los datos son independientes entre sí, existe una matriz inversa $(W^T W)^{-1}$ no nula con la que es posible multiplicar ambos miembros de (4.80):

$$(X^T X)^{-1} X^T Y = (X^T X)^{-1} X^T X B \rightarrow (X^T X)^{-1} X^T Y = I B = B \quad (4.81)$$

donde I es la matriz identidad. Ec. (4.76) permite calcular los coeficientes B que minimizan Λ a partir de la matriz de datos W .



5. CÁLCULO DE PÉRDIDAS Y GANANCIAS DE CALOR A TRAVÉS DE LA ENVOLVENTE

5.1 Aplicación del “método directo”

5.1.1 Estimación de las resistencias superficiales

El empleo de la cámara termográfica es de gran utilidad para medir temperaturas con buena precisión en una forma sencilla, especialmente en invierno cuando las diferencias de temperatura son significativas. La Figura 5-1 muestra la evolución de las temperaturas T_{se} y T_{si} en los paneles de vidrio, además de T_i y T_e , mientras en la Figura 5-2 se representa la evolución de las diferencias relativas de temperatura $\frac{T_i - T_{si}}{T_i - T_e}$ y $\frac{T_{se} - T_e}{T_i - T_e}$ asociadas con R_{si} y R_{se} (Ecs. 4.5), respectivamente, en diferentes momentos del día y para los mismos días de registro. Estas mediciones corresponden a la fachada orientada al NO. Es interesante notar que estas diferencias tienen valores similares a aquellos de $\frac{T_{se} - T_{si}}{T_i - T_e}$ (asteriscos en Figura 5-2) asociados con la resistencia térmica del material. Por lo tanto, las resistencias de ambas capas superficiales de aire son tan importantes como la resistencia térmica del material, implicando que los valores de R_{si} y R_{se} son diferentes de aquellos usados en el diseño y cambian con la ubicación de la componente y la hora del día. Al mediodía, $T_{si} \approx T_i$, probablemente porque la radiación solar calienta el aire próximo a las superficies vidriadas orientadas al NO. En este caso, la resistencia R_{si} es despreciable y la resistencia total $R_T = R_{se} + e/k$.

La Tabla 5.i muestra que las resistencias térmicas R_{si} de las superficies vidriadas son del mismo orden de, o menores que, el valor corrientemente sugerido por la Norma IRAM 11601 (i.e., $0.13 \text{ m}^2\text{C/W}$ – Tabla 2.i), mientras aquellas de las paredes son más del doble de este valor de diseño. Por el contrario, las resistencias térmicas superficiales R_{se} son mucho mayores que las sugeridas para paredes y superficies vidriadas (i.e., $0.04 \text{ m}^2\text{C/W}$), reduciendo significativamente la conductividad térmica efectiva de la envolvente con respecto al valor de diseño.

Los valores de $\frac{R_{si}}{R_T}$, $\frac{e}{kR_T}$ y $\frac{R_{se}}{R_T}$, calculados usando las Ecs. (4.5) basadas en mediciones de temperatura, correspondientes a diferentes componentes constructivos de la envolvente y horas del día, se promedian y presentan en la Tabla 5.ii. Las variaciones espacio-temporales de R_{si} y R_{se} confirman la influencia de la compleja dinámica de las capas límites superficiales de aire, como ya se mencionó en §4.1, debido a la presencia de otras paredes cercanas, a la distinta cantidad de radiación solar incidente y al efecto del viento actuando sobre cada componente de la envolvente. Estos factores cambian a lo largo del día, teniendo lugar las fluctuaciones más significativas al mediodía. Sin subestimar la importancia de estos cambios, es interesante obtener los valores medios representativos de q_{ss} lo cual se hace a continuación.

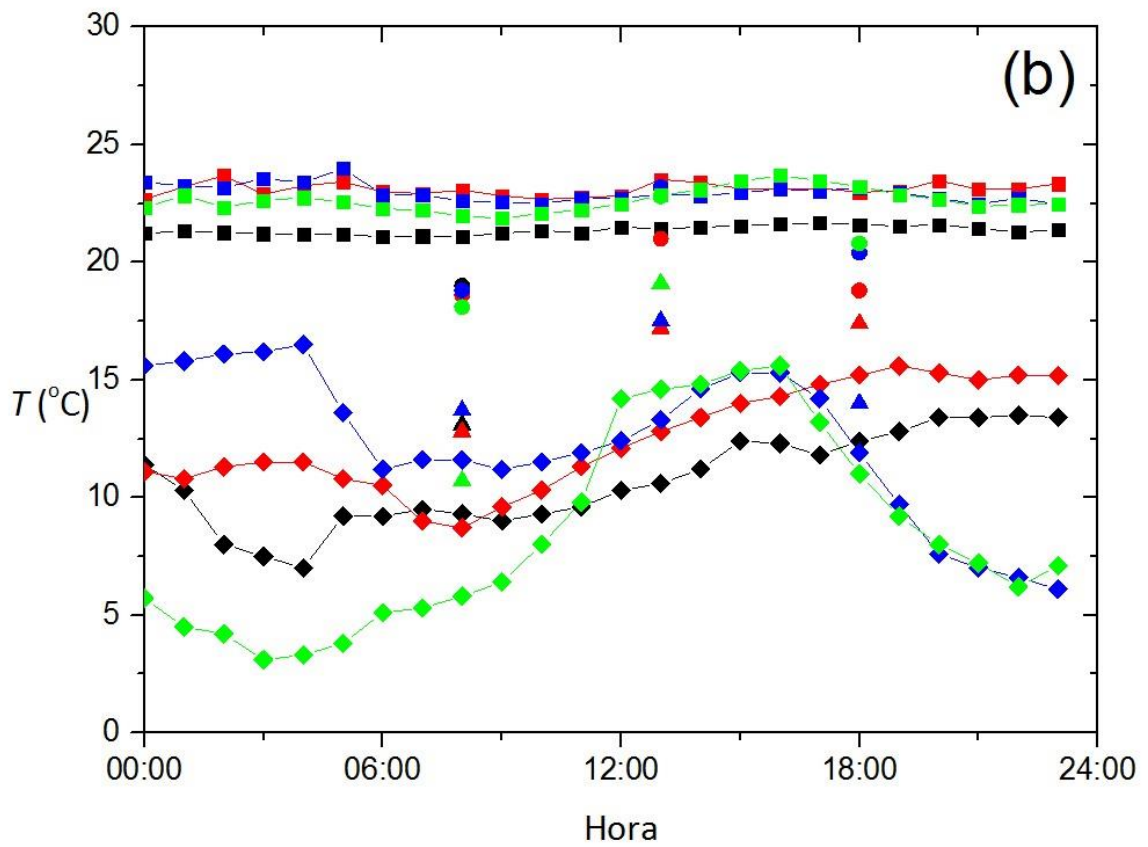
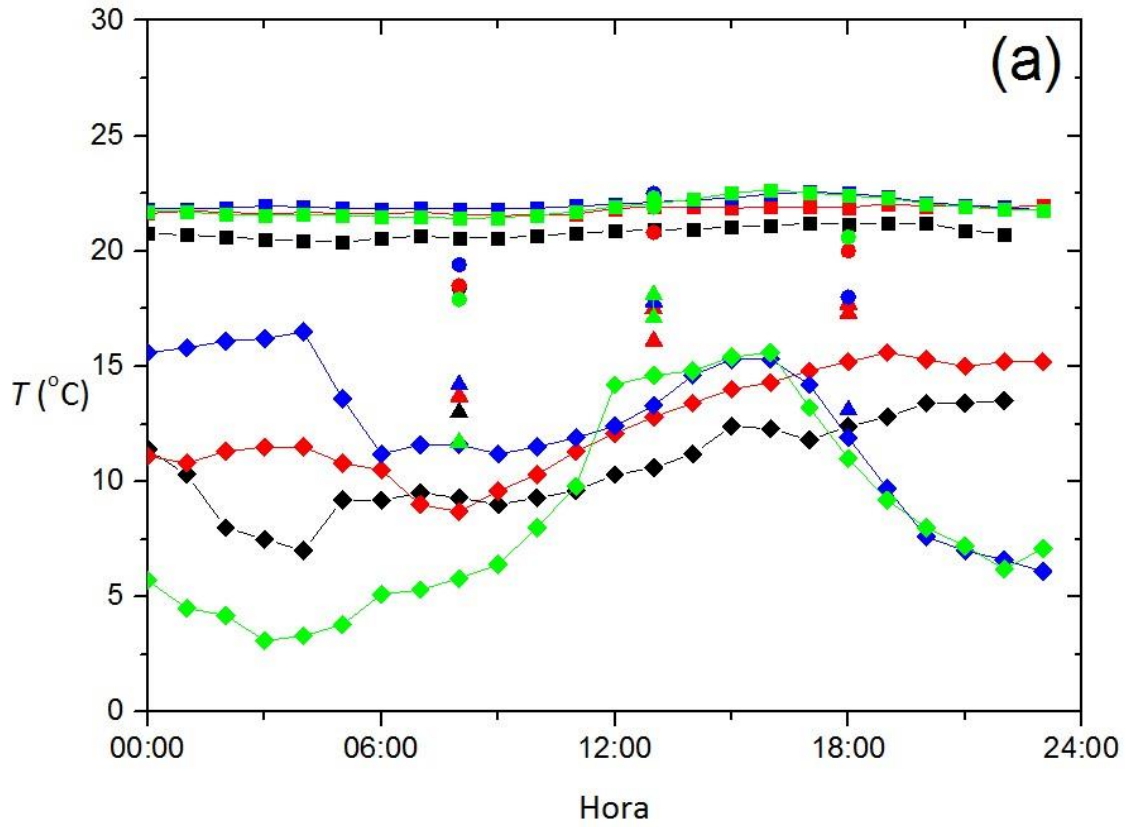


Figura 5-1: Evolución de las temperaturas en el interior (T_i , ■) y exterior (T_e , ◆) del edificio, y sobre las caras interna (T_{si} , ●) y externa (T_{se} , ▲) de las superficies vidriadas, para las plantas baja (a) y alta (b), registradas el 16 de junio (negro), y 14 (rojo), 15 (azul) y 16 (verde) de julio de 2014. Las barras de error tienen tamaños similares a los de los símbolos.

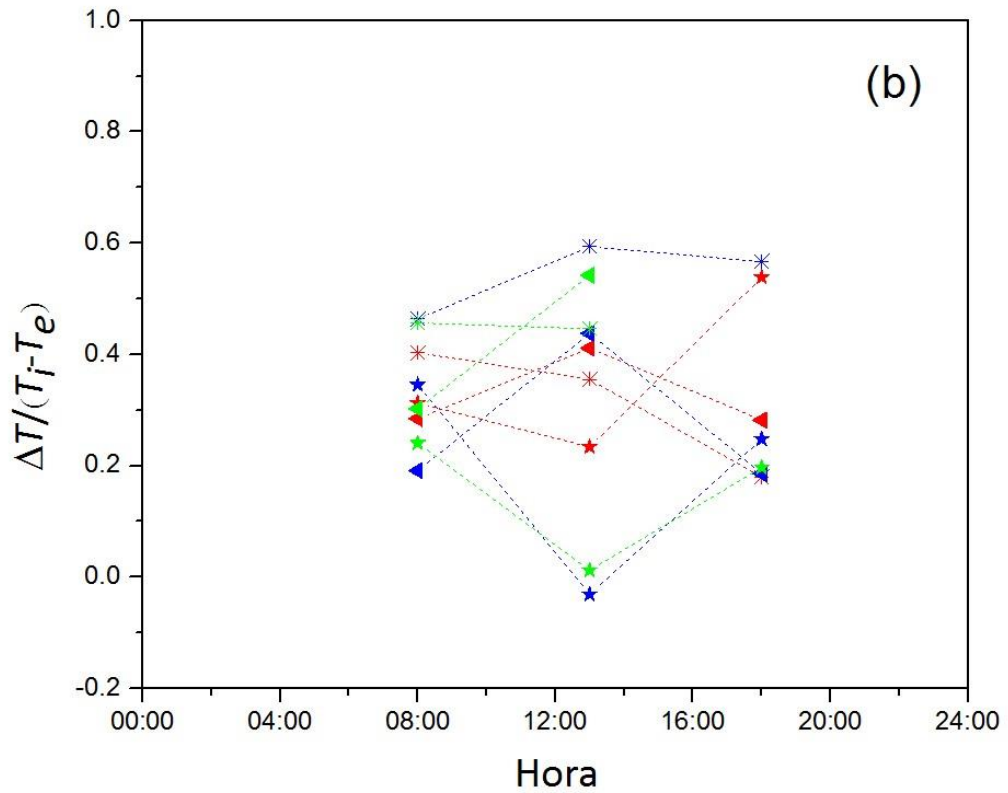
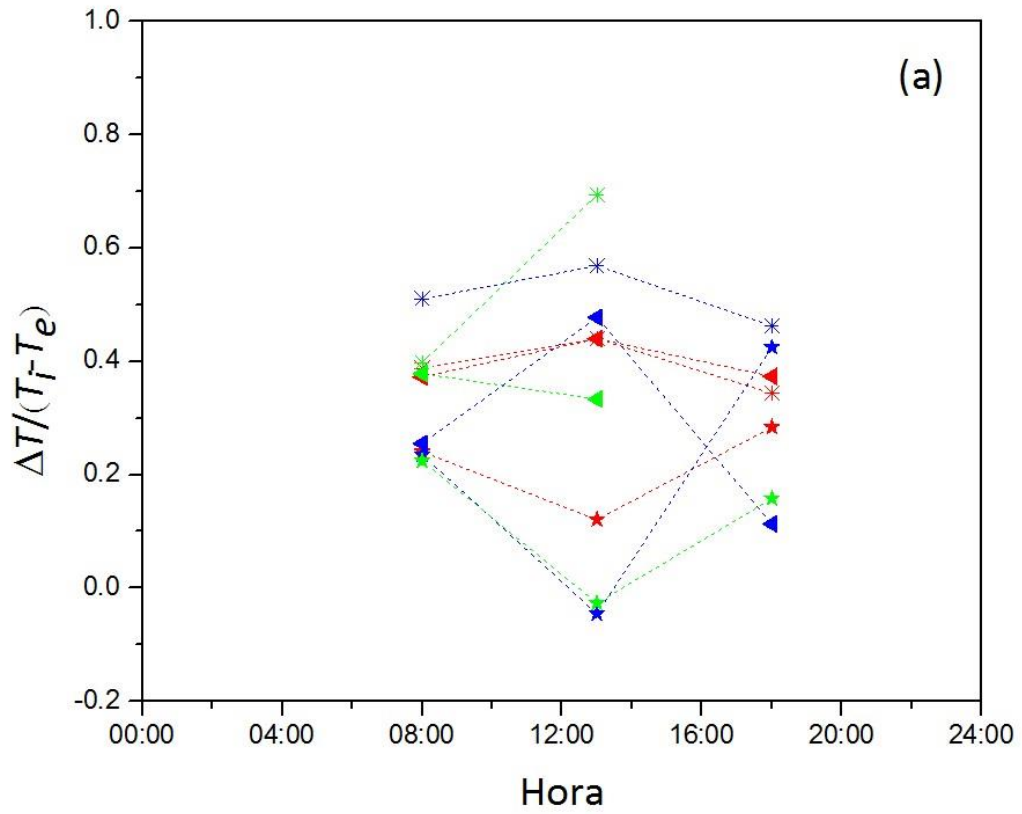


Figura 5-2: Diferencia relativa de temperatura entre el interior y la cara interna de las ventanas de vidrio (★), $(T_i - T_{si})/(T_i - T_e)$, entre las caras interna y externa de las ventanas de vidrio (*), $(T_{si} - T_{se})/(T_i - T_e)$, y entre la cara externa y el exterior (◀), $(T_{se} - T_e)/(T_i - T_e)$, correspondientes al 14 (rojo), 15 (azul) y 16 (verde) de julio de 2014 en PB (a) y PA (b).

		Componente 2 (Superficies vidriadas)			Componentes 7,13, 18 (Ventanas)			Componentes 4, 22 (Paneles y puertas vidriados)		
		8:00h	13:00h	18:00h	8:00h	13:00h	18:00h	8:00h	13:00h	18:00h
PA	R_{si}	0.103	0.038	0.09	0.069	0.046	0.113	0.089	---	0.074
	R_{se}	0.106	0.130	0.071	0.106	0.113	0.063	0.157	0.196	0.199
PB	R_{si}	0.093	0.073	0.103	0.102	0.100	0.123	---	---	---
	R_{se}	0.081	0.145	0.073	0.083	0.099	0.023	---	---	---

		Componentes 5, 10,11,15,16, 21 (Paneles y puertas vidriados)			Componentes 3, 6, 9, 12, 14, 17, 20, 23 (Paredes)			Componentes 7, 13, 18 (Paredes)		
		8:00h	13:00h	18:00h	8:00h	13:00h	18:00h	8:00h	13:00h	18:00h
PB	R_{si}	0.070	0.044	0.101	0.240	0.157	0.303	0.215	0.354	0.326
	R_{se}	0.104	0.107	0.032	0.574	0.813	0.629	0.264	0.520	0.078
PA	R_{si}	---	---	---	0.404	0.294	0.355	0.301	0.463	0.430
	R_{se}	---	---	---	0.465	0.676	0.636	0.223	0.381	0.046

Tabla 5.i: Valores medios de las resistencias térmicas superficiales de las componentes de la envolvente edilicia indicadas en la Figura 3-4 para ambas plantas.

5.1.2 Pérdidas de calor en invierno

Usando las Ecs. (4.4b) con los valores de T_{si} y T_{se} medidos temprano en la mañana y al atardecer, el flujo de calor perdido a través de cada componente constructiva se relaciona con la diferencia de temperatura ($T_i - T_e$) como muestra la Figura 5-3a para las superficies vidriadas de la fachada principal del edificio evaluado (componentes 2) y la Figura 5-3b para las paredes laterales (componentes 7, 13 y 18). Las líneas de mejor ajuste determinadas con el método de los mínimos cuadrados tienen una desviación estándar de 0.27 en ambos casos y el coeficiente de determinación (*adjusted R*²) del proceso de ajuste es igual a 0.51 y 0.42 para los datos ajustados en las Figuras 5-3a y 5-3b, respectivamente. Notar también que la relación entre el flujo de calor q_{ss} y la diferencia de temperatura ($T_i - T_e$) tiene una pendiente diferente (i.e., U – Ec. 4.1) según el material y la localización (puesto que las resistencias superficiales son diferentes). Las dependencias lineales como aquellas encontradas en estas figuras se observan también para las otras componentes de la envolvente, excepto para algunos valores correspondientes a las paredes obtenidos a mediodía, con cielo despejado. En estos casos, que se analizan por separado en §5.3, resulta $T_{se} > T_i$ debido al calentamiento solar de las paredes, por lo que la contribución de este particular flujo de calor no se considera en el cálculo de los valores medios presentados en la Tabla 5.ii. No obstante, el valor principal del flujo total de calor $Q_{ss} = Aq_{ss}$, donde A es el área de la componente de la envolvente considerada, no es afectado porque la mayoría de las mediciones fueron realizadas en días nublados; además, la contribución de las paredes juega un papel secundario como se infiere de los resultados mostrados en la Tabla 5.ii. La Tabla 5.iii presenta la contribución individual de cada componente

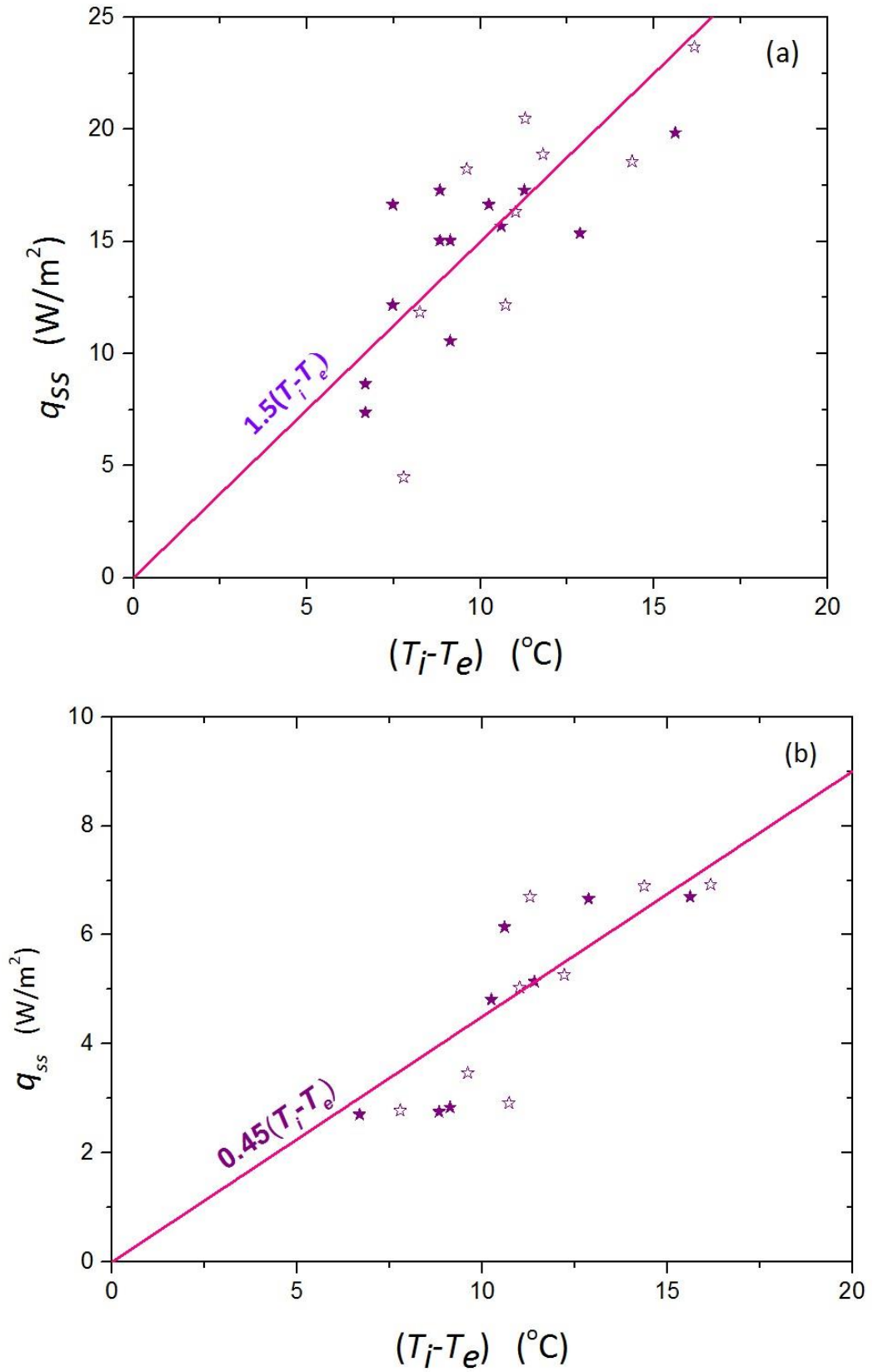


Figura 5-3: Flujo de calor por unidad de área a través de los componentes 2 (a) y 7, 13, 18 (b) del edificio en planta baja (símbolos llenos) y planta alta (símbolos abiertos) en función de la diferencia térmica entre interior y exterior.

		Componentes 2 (Superficies vidriadas)			Componentes 7, 13, 18 (Ventanas)			Component 4, 22 (Paneles y puertas vidriadas)		
		8:00h	13:00h	18:00h	8:00h	13:00h	18:00h	8:00h	13:00h	18:00h
PB	R_{si}/R_T	0.233	0.121	0.289	0.221	0.146	0.362	0.250	0.093	0.207
	$e/(kR_T)$	0.439	0.441	0.490	0.444	0.439	0.439	0.308	0.359	0.413
	R_{se}/R_T	0.340	0.417	0.228	0.338	0.363	0.394	0.439	0.547	0.556
	U (W/m ² °C)	1.5			1.5			0.8		
PA	R_{si}/R_T	0.299	0.234	0.328	0.326	0.319	0.394			
	$e/(kR_T)$	0.456	0.406	0.357	0.467	0.456	0.456			
	R_{se}/R_T	0.259	0.464	0.234	0.265	0.318	0.072			
	U (W/m ² °C)	1.5			1.5					

		Componentes 5,10, 11, 15, 16, 21 (Paneles y puertas vidriadas)			Componentes 3, 6, 9, 12, 14, 17, 20, 23 (Paredes)			Componentes 7, 13, 18 (Paredes)		
		8:00h	13:00h	18:00h	8:00h	13:00h	18:00h	8:00h	13:00h	18:00h
PB	R_{si}/R_T	0.225	0.140	0.323	0.173	0.113	0.218	0.155	0.255	0.235
	$e/(kR_T)$	0.523	0.727	0.670	0.416	0.303	0.485	0.656	0.433	0.665
	R_{se}/R_T	0.334	0.341	0.104	0.574	0.813	0.629	0.264	0.520	0.078
	U (W/m ² °C)	1.9			0.3			0.45		
PA	R_{si}/R_T	---	---	---	0.291	0.212	0.256	0.216	0.333	0.309
	$e/(kR_T)$	---	---	---	0.375	0.299	0.304	0.633	0.440	0.640
	R_{se}/R_T	---	---	---	0.465	0.676	0.636	0.223	0.381	0.046
	U (W/m ² °C)				0.3			0.45		

Tabla 5.ii: Valores medios de R_{si}/R_T , $e/(kR_T)$ y R_{se}/R_T calculados con Ecs. (4.5) y transmitancia térmica global de las componentes de la envolvente indicadas en Fig. 3-3. Los valores de U corresponden a la pendiente de las líneas que mejor ajustan los puntos experimentales de la Fig. 5-3.

constructiva a Q_{ss} (en W y %) perdido durante los días en los que las mediciones fueron hechas junto con los correspondientes valores de e , k/e , U y A . Se encuentra que el 53% de la superficie de la envolvente afectada es vidriada, la cual contribuye con el 83% a Q_{ss} gracias a su mayor conductividad térmica con respecto a la de las paredes. La variación temporal de Q_{ss} se ilustra en la Figura 5-4. Esta información, obtenida considerando el régimen estacionario del flujo de calor proporciona una primera aproximación que es muy útil ya que el edificio evaluado se encuentra en un Campus universitario donde no hay medidores del consumo de gas y electricidad en cada edificio. Sin embargo, es necesario realizar un análisis más detallado que considere los efectos dinámicos, especialmente en las paredes.

5.1.3 Tiempo de respuesta térmica del edificio

El hecho por el cual la transmitancia térmica global U_T del edificio se debe principalmente a las superficies de vidrio mientras la contribución principal a m es dada por la masa térmica de las paredes y de los objetos que se encuentran en el interior del edificio, también sustenta la hipótesis

Nº	Components:	e (m)	k/e (W/m ² °C)	U (W/m ² °C)	A (m ²)	Q_{ss} (W)	Q_{ss} (%)
1	Paneles de vidrio, fachada frontal	0.024	3.2	1.5	91.09	136.64	19.5
2	Ventanas	0.024	3.2	1.5	136.52	204.78	29.2
3	Puertas y paneles de vidrio fuera del perímetro externo, fachada frontal	0.028	2.8	0.8	37.21	29.77	4.2
4	Puertas y paneles de vidrio fuera del perímetro externo, fachadas laterales	0.02	3.2	1.9	111.43	211.72	30.2
5	Paredes, fachadas laterales	0.3	0.72	0.3	230.92	69.28	9.9
2	Paredes debajo de ventanas, fachadas laterales	0.3	0.72	0.45	109.24	49.16	7.0
Total:					716.42	701.34	100.0

Tabla 5.iii: Parámetros característicos de las componentes de la envolvente y flujo de calor total Q_{ss} perdido a través de cada una de ellas durante los días de medición.

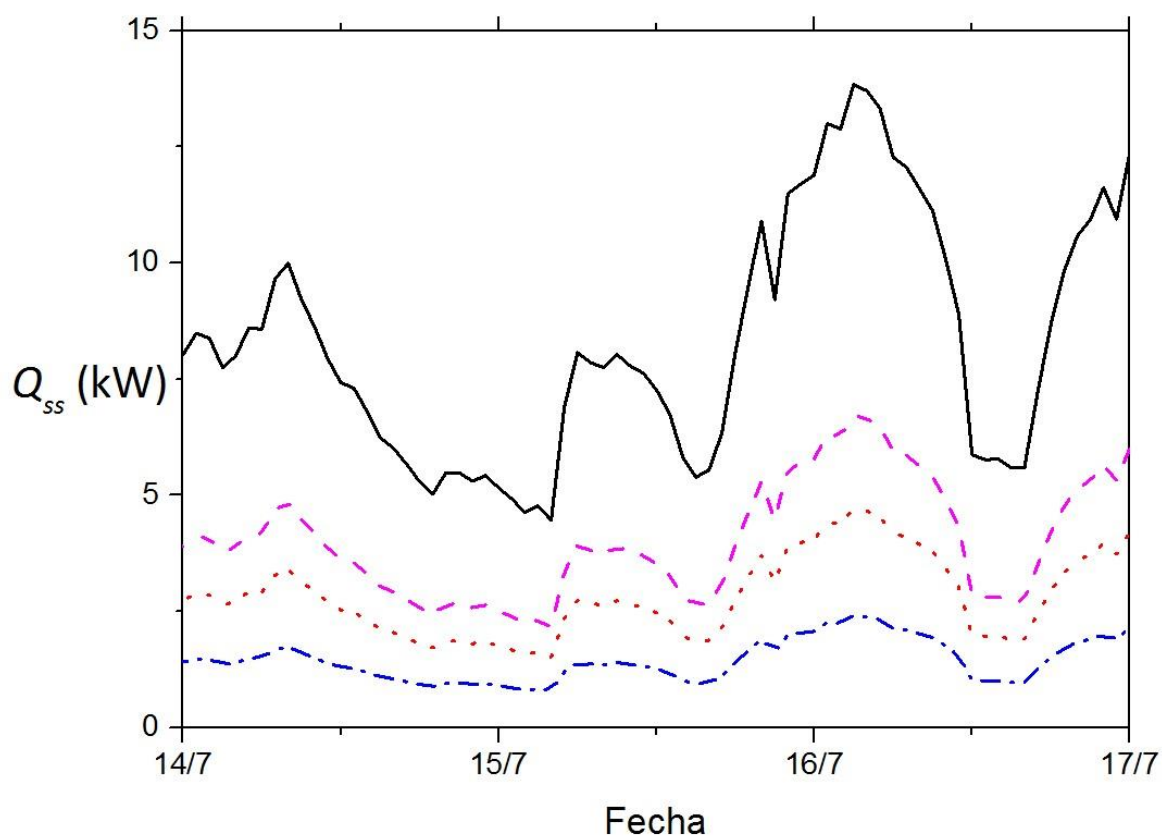


Figura 5-4: Evolución del flujo total perdido por conducción (línea continua) y las contribuciones de las aberturas vidriadas de la fachada NorOeste (línea de trazos), las puertas y ventanales de vidrio retirados de la línea de edificación (línea de puntos), y los muros (línea de puntos y trazos).

de un estado estacionario para calcular el flujo de calor. La solución del problema inverso consiste, entonces, en encontrar el tiempo característico χ de respuesta del edificio (Ec. 4.74) frente a variaciones de T_e a partir de la evolución de $T_i(t)$ y $T_e(t)$ por medio de una ecuación alternativa a (4.74).

Cuando T_e y T_i varían en una escala de tiempo mucho mayor que el tiempo de difusión del calor en las paredes (§4.2.2), la transferencia de calor resulta cuasi-estacionaria, es decir que puede aproximarse a la de una sucesión de estados estacionarios que se verifican instante a instante. Entonces, si $(T_e - T_i) > 0$ y se establece un flujo de calor $Q_T > 0$ hacia el interior, se tiene que

$$Q_T(t) = U_T(T_e - T_i), \quad (5.1)$$

El ingreso de calor $Q_T(t)$ aumenta T_i de acuerdo a

$$Q_T(t) = m_T C_{pT} \frac{dT_i}{dt}, \quad (5.2)$$

Igualando (5.1) y (5.2) se obtiene la siguiente ecuación diferencial simple

$$\chi \frac{dT_i}{dt} = T_e - T_i, \quad (5.3)$$

Notar que no importan los valores de cada uno de los parámetros por separado sino la relación entre la inercia térmica global del edificio y la transmitancia térmica media de su envolvente. Por otra parte, la incerteza de χ es la suma de las incertezas de los valores de cada componente. El significado de χ es el de un tiempo característico de respuesta de la edificación frente a variaciones de la temperatura externa. Por ejemplo, si $T_e - T_i = \Delta T = \text{const}$, la solución de Ec. (5.3) es $T_i = T_i(t=0) + \Delta T e^{-t/\chi}$ y χ representa el tiempo necesario para que la temperatura interna cambie en un factor $\Delta T/e$. Esta propiedad de las paredes es reconocida y empleada desde hace tiempo en modelos térmicos dinámicos de una habitación o de edificaciones sencillas (Davis, 2004a). Así, hay diferentes formas de estimar χ por medio de series de Fourier, funciones de auto-correlación, transformadas, etc. (Urbikain y Davies, 2008). Aquí se emplea un método sencillo de cálculo en forma similar al empleado por Davis (2004b), aunque no hora por hora sino empleando la totalidad de los datos (juntos) de 60 días para disminuir los errores de las mediciones y, consistentemente, el de los coeficientes resultantes.

La Tabla 5.iv presenta los valores de los parámetros asociados, el área ocupada por cada componente y los valores totales de $m_T C_{pT}$ y U_T . Aplicando la Ec. (4.40), se obtiene que $\chi \approx 1.65$ y 3.07 días para la PB y la PA respectivamente, que son similares a los valores obtenidos a partir de mediciones y aplicando el método inverso. La diferencia entre los valores de χ que resultan de la resolución del problema directo y las mediciones se encuentra probablemente dentro de la incerteza de los valores adoptados de los parámetros, especialmente la masa térmica $m_T C_{pT}$. Sin dudas, el comportamiento dinámico de las paredes muestra que no toda la masa térmica de la envolvente

Componente	Material	e	U	ρ_j	A_j (m ²)		C_p	$m_T C_{pT}$		$U_T = \sum_j A_j U_j$	
		(m)	(W/m ² K)	(Kg/m ³)	PB	PA	(J/Kg°C)	PB	PA	PB	PA
1- Vidrios DVH	Cámara de aire	0.006	2.073	1.2	171	201	1000	1	1	354	417
	Vidrio	0.018		2500			750	5771	6784		
2- Vidrios DVH	Cámara de aire	0.012	1.897	1.2	19		1000	0		36	
	Vidrio	0.018		2500			750	641			
3- Muros	Revoque fino	0.005	0.643	1400	309	300	1000	2163	2100	199	193
	Revoque grueso	0.020		1400			1050	9085	8820		
	Ladrillo hueco	0.120		800			920	27291	26496		
	PEE	0.035		17			1700	313	303		
	Ladrillo visto	0.120		1100			1000	40788	39600		
4- Techo de losa	Hormigón	0.100	0.615	1800		1202	1000		267120		739
	Carpeta	0.020		1500			1300		57876		
	Geotextil	0.050		300			1350		30051		
	Contrapiso	0.026		600			1300		29517		
	PEE	0.05		17			1700		2179		
	Yeso	0.01		600			837		1765		
	Cámara de aire	0.5		1.2			1000	603			
5- Techo de chapa	Chapa galvanizada	0.002		8000		282	500		2256		173
	PEE	0.05		17			1700		407		
	Cámara de aire	1.5		1.2			1000		508		
6- Lucarna	Vidrio blindado	0.008		2500		25	750		656		15
7- Piso	Baldosas	0.020	1.52	1700	1509		800	41045		2294	
	Contrapiso	0.130		1200			1200	282485			
								410239	470219	2883	1538
										$\chi_{PB}(h)$	$\chi_{PA}(h)$
										39.5	73.6

Tabla 5.iv: Valores de los parámetros asociados con las componentes de la envolvente edilicia (Normas IRAM) y tiempos característicos χ para PB y PA calculados con Ec. (4.52).

edilicia sigue la evolución de T_i . Por otro lado, la masa térmica de los objetos que se encuentran en el interior del edificio (libros, estanterías, muebles, paredes internas, etc.) deberían también ser incorporados al cálculo.

Los valores de R_{si} y R_{se} , requeridos para el cálculo de la resistencia térmica, representan otra fuente de incerteza. En efecto, en §5.1.1 se encuentra que, midiendo con la cámara termográfica las temperaturas T_{si} y T_{se} , junto con las temperatura T_i y T_e , las resistencias superficiales son mucho

mayores que los valores proporcionados para el edificio evaluado.

En vista de la incerteza de los cálculos asociados con el problema directo, la comparación entre los resultados de resolver los problemas directo e inverso muestra un razonable acuerdo. En la práctica, los coeficientes y factores usados en la Ec. (4.74) cuando resolvemos el problema directo pueden eventualmente ajustarse para alcanzar los resultados globales. El cálculo inverso carece de la opción de una corrección similar puesto que se basa en mediciones y procedimientos estándares de ajuste al conjunto de datos.

5.2 Calculo de los factores de respuesta dinámicos

Como se describió en §3.1, entre las características del edificio se destacan la presencia de un amplio atrio central y la fachada frontal compuesta mayormente de superficies DVH aunque el resto de la envolvente también se compone de una considerable cantidad de cerramientos de vidrio. Las paredes perimetrales fueron construidas con varias capas de materiales distintos respetando las normas técnicas vigentes (Muro 1, Tabla 5.v).

A los fines de comparación, el análisis de los factores de respuesta se aplica también a los Muros 2 y 3 (Tabla 5.v) mencionados por la Norma IRAM 11601. Para evaluar la influencia de la localización geográfica, el análisis se extiende a dos tipos de paredes de edificios construidos en la ciudad de Colalao del Valle (Muro 4; DiBernardo et al., 2011) y en la ciudad de Córdoba (Muro 5; Garzón y Mendoca, 2012) en Argentina, y a los Muros 6 y 7 utilizados como casos testigos por el Programa de Simulación de Muros *EnerHabitat* (Barrios et al., 2014) desarrollado por el *Instituto de Energías Renovables* (Universidad Nacional Autónoma de México).

Luego, la Tabla 5.v presenta las características de los 7 tipos de muros analizados. R_T y U se calculan mediante la Ec. (4.2) con los valores proporcionados por la norma IRAM 11601. Los valores de la conductividad, la densidad y el calor específico de las capas de aire se introducen por completitud pero no se emplean en el cálculo de R_{se} , R_{si} y U . Las componentes reales de los factores de respuesta dinámicos Y_{se} , f , y φ calculados para cada capa de material (últimas tres columnas) se resaltan por claridad. Los valores observados en la fila “Total” surgen de multiplicar las matrices complejas de todas las capas. Notar que los valores resultantes para el muro completo no corresponden a las sumas de los factores de las componentes individuales. La Figura 5-5b muestra los cambios de los factores dinámicos a medida que se agregan capas de material hasta conformar el Muro 1, esquematizado en la Figura 5-5a. Observar que los materiales que más influyen en el cálculo son los ladrillos visto y hueco, aunque todos contribuyen al aumento de R_T y a la disminución de U y, por ende, a la reducción de f .

El significado físico de los factores de respuesta se evidencia mejor representando las variables en función del tiempo en casos concretos. Por ejemplo, si la temperatura externa cambia con una

	e (m)	k (W/m°C)	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg°C)	R (m ² °C/W)	U (W/m ² °C)	Y_{se} (W/m ² °C)	f	φ (h)
Muro 1 - Biblioteca UNCPBA									
R_{se}		0.024	1.2	1012	0.040	8	8	1.000	-2.1E-5
Ladrillo visto	0.120	0.810	1600	1000	0.150	6.75	8.65	0.977	-1.3
Poliestireno	0.037	0.037	17	1700	1.000	1.06	1.06	1.000	-0.0442
Ladrillo hueco	0.120	0.333	800	920	0.400	2.78	3.72	0.971	-1.5
Rev. grueso	0.020	0.930	1400	1050	0.022	46.5	46.5	1.000	-0.029
Rev. fino	0.005	0.700	1400	1012	0.007	140	140	1.000	-0.0023
R_{sj}		0.024	1.2	1012	0.130	24	24	1.000	-2.3E-6
Total	0.302				1.749	0.606	5.156	0.28	-10.03
Muro 2 - Pared de ladrillo hueco de 0.12 m con revoques									
R_{se}			1.2	1012	0.040	8	8	1.000	-2.1E-5
Rev. fino	0.005	0.700	1400	1012	0.007	140	140	1.000	-0.0023
Rev. grueso	0.020	0.930	1400	1050	0.005	186	186	1.000	-0.0018
Ladrillo hueco	0.120	0.333	800	920	0.360	2.78	3.72	0.971	-1.5
Rev. grueso	0.020	0.930	1400	1050	0.005	186	186	1.000	-0.0018
Rev. fino	0.005	0.700	1400	1012	0.007	140	140	1.000	-0.0023
Rsi		0.024	1.2	1012	0.130	24	24	1.000	-2.3E-6
Total	0.170				0.554	1.813	2.972	0.073	-2.715
Muro 3 - Pared doble de hormigón									
R_{se}		0.024	1.2	1012	0.040	8	8	1.000	-2.1E-5
Hormigón	0.045	1.630	2400	880	0.028	36.2	36.3	1.000	-0.12
Poliestireno	0.025	0.037	17	1700	0.676	1.48	1.48	1.000	-0.0023
Hormigón	0.080	1.630	2400	880	0.049	20.4	20.9	0.998	-0.38
R_{sj}		0.024	1.2	1012	0.130	24	24	1.000	-2.3E-6
Total	0.150				0.923	1.088	4.694	0.652	-5.242
Muro 4 - Pared de ladrillo común de 0.18 m revocado									
R_{se}		0.024	1.2	1012	0.040	8	8	1.000	-2.1E-5
Ladrillomacizo	0.180	0.910	1800	1000	0.028	5.06	9.93	0.896	-2.8
Rev. grueso	0.015	0.930	1400	1050	0.676	62	62	1.000	-0.016
Rev. fino	0.005	0.700	1400	1012	0.007	140	140	1.000	-0.0023
Rsi		0.024	1.2	1012	0.130	24	24	1.000	-2.3E-6
Total	0.200				0.391	2.579	4.975	0.524	-6.085
Muro 5 - Pared doble de ladrillo común y ladrillo visto									
R_{se}		0.024	1.2	1012	0.040	8	8	1.000	-2.1E-5
Ladrillo visto	0.120	0.810	1600.0	1000	0.148	6.75	8.65	0.976	-1.3
Poliestireno	0.030	0.037	17.0	1700	0.811	1.23	1.23	0.999	-0.033
Lad. macizo	0.060	0.910	1800.0	1000	0.066	15.2	15.5	0.998	-0.33
Rev. grueso	0.015	0.930	1400.0	1050	0.016	62	62	1.000	-0.016
Rev. fino	0.005	0.700	1400.0	1012	0.007	140	140	1.000	-0.0023
R_{sj}		0.024	1.2	1012	0.130	24	24	1.000	-2.3E-6
Total	0.230				1.218	0.823	5.128	0.359	-8.137
Muro 6 - Pared sin aislación (México)									
R_{se}		0.024	1.2	1012	0.040	8	8	1.000	-2.1E-5
Revoque	0.015	1	1800	1100	0.015	66.7	66.7	0.999	-0.021
Ladrillomacizo	0.140	0.700	1970	800	0.200	5	7.86	0.946	-2
Revoque	0.015	1	1800	1100	0.015	66.7	66.7	0.999	-0.021
R_{sj}		0.024	1.2	1012	0.130	24	24	1.000	-2.3E-6
Total	0.170				0.400	2.521	4.693	0.634	-5.235
Muro 7 - Pared con aislación (México)									
R_{se}		0.024	1.2	1012	0.040	8	8	1.000	-2.1E-5
Revoque	0.010	1	1800	1100	0.010	100	100	1.000	-0.0092
Poliestireno	0.050	0.035	24	1400	1.429	0.7	0.7	0.999	-0.11
Ladrillomacizo	0.140	0.700	1970	800	0.200	5	7.86	0.946	-2
Revoque	0.015	1	1800	1100	0.015	66.7	66.7	0.999	-0.021
R_{sj}		0.024	1.2	1012	0.130	24	24	1.000	-2.3E-6
Total	0.215				1.824	0.549	1.501	0.442	-6.727
Paneles de vidrio (DVH)									
R_{se}		0.024	1.2	1012	0.040	8	8	1.000	-2.1E-5
Vidrio	0.009	0.077	2500	880	0.117	8.56	8.57	0.999	-0.11
Vacío	0.012	0	0	0	0.156	6.42	6.42	1.000	0
Vidrio	0.009	0.077	2500	880	0.117	8.56	8.57	0.999	-0.11
R_{sj}		0.024	1.2	1012	0.130	24	24	1.000	-2.3E-6
Total	0.030				0.560	1.798	2.031	0.982	-1.098

Tabla 5.v: Parámetros característicos y factores dinámicos para los distintos muros evaluados. Se resaltan los valores correspondientes al Muro 1, tomado como referencia.

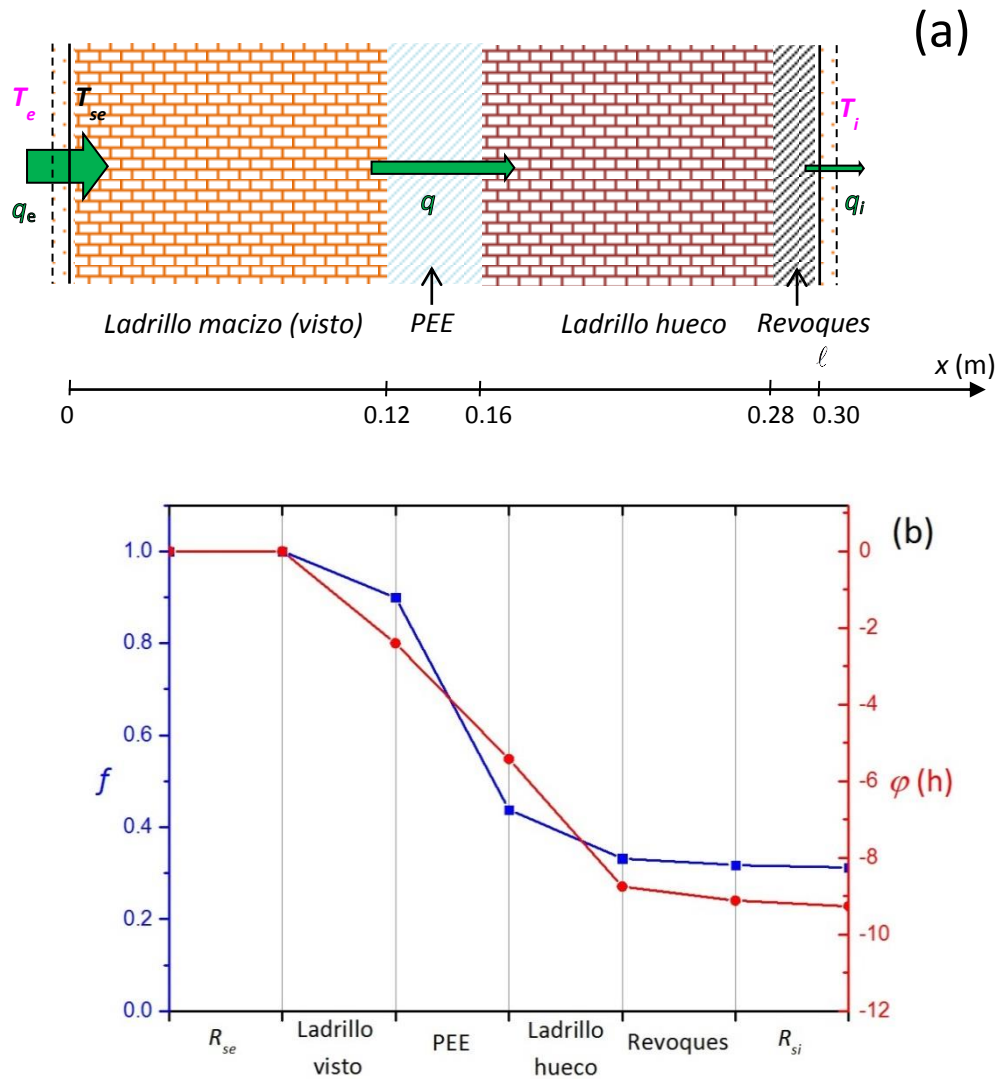


Figura 5-5. (a) Esquema constructivo, y (b) factor de decremento (línea azul) y retraso (línea roja) correspondientes al Muro 1.

amplitud de 10°C mientras que la interior se mantiene constante, se obtienen los gráficos mostrados en la Figura 5-6. En todos los casos, la curva del flujo de calor $q_e(t)$ que ingresa desde la pared externa se encuentra adelantada con respecto a la curva de temperatura $T_e(t)$, análogamente al adelanto experimentado por la corriente eléctrica con respecto al potencial en los circuitos resistivos-capacitivos de corriente alterna como se mencionó en §4.2.1.

Para un muro construido con ladrillos comunes y revoques, la distancia de penetración es $x^* \approx 0.12 \text{ m}$ (Tabla 4.i). Cuando el espesor del muro es 0.17 m (Figura 5-6a), el flujo q_i a través del muro es similar (aunque con un retardo) al flujo q_e que ingresa por la cara externa. Para un muro de 0.20 m (Figura 5-6b), q_e aumenta debido a la capacidad de almacenamiento energético del material, mientras q_i se reduce levemente con un retraso mayor. Para un muro doble como el de la Biblioteca Central (Figura 5-6c), q_e es aún mayor pero casi no pasa calor al interior. El valor de q_i es muy diferente a del flujo estacionario q_{ss} calculado con Ec. 4.1, y entonces es imprescindible considerar las variaciones temporales por medio de los factores dinámicos que dan cuenta de la solución de la

ecuación (4.10) del calor. Finalmente, la Figura 5-6d ilustra el comportamiento de las superficies vidriadas del edificio. En este caso no hay diferencia apreciable entre q_e y q_i ni retrasos, de modo que el cálculo de q bajo la hipótesis de flujo estacionario (Ec. 4.1) es válido y $q_e \approx q_i \approx q_{ss}$. El análogo eléctrico es el de un material fundamentalmente resistivo, es decir, con alta resistencia y relativamente bajas densidad y capacidad calorífica.

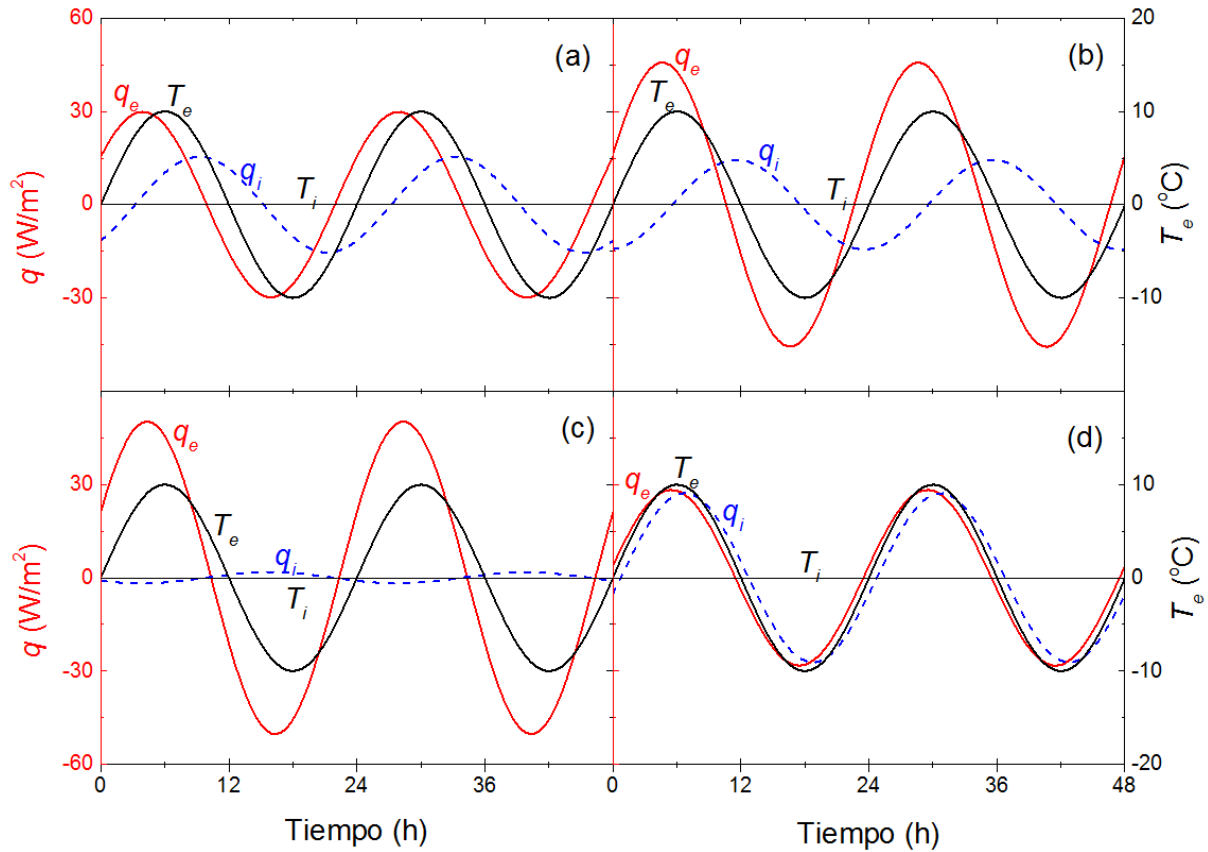


Figura 5-6: Evolución del flujo de calor a través de la cara externa (línea roja) e interna (línea azul) para una variación periódica de 10 °C en la superficie exterior y temperatura constante sobre la superficie interna (líneas negras) para: (a) muro 2, (b) muro 4, (c) muro 1 y (d) DVH.

5.3 Cálculo del flujo de calor a través de muros expuestos a radiación solar directa todo el día considerando $T_{sol-aire}$

Calculemos el flujo de calor a través de los muros de los sectores constructivos 3, 7 y 32 (PA y PB) indicados en la Figura 3-4 y mostrados en la Figura 5-7. Esta parte de la envolvente recibe una importante (y similar) cantidad de radiación solar a lo largo del día. Los valores de las propiedades térmicas de los materiales que componen estos muros se presentan en la Tabla 3.ii y del muro 1 en la Tabla 5.v. Los termogramas se adquirieron diariamente entre el 19 y 30 Octubre 2015 (primavera), 29 Marzo y 7 Abril 2016 (otoño), 4 y 15 Julio 2016 (invierno) y 29 Noviembre y 7 Diciembre 2016 (verano) en los intervalos horarios 7:15–8:00, 13:00–13:45 y 19:00–19:45. Las mediciones efectuadas en días ventosos, lluviosos y/o con niebla fueron descartadas. Como se describe en §3.2.1, las

temperaturas T_i en PB y PA corresponden al promedio de los datos proporcionados por los sensores *HOBO U12* dispuestos en cada planta. La temperatura T_e se obtiene de la información suministrada por el *Servicio Meteorológico Nacional* y la irradiancia I_{med} de la estación meteorológica emplazada a 200 m del edificio.



Figura 5-7: Localización de los sectores constructivos evaluados orientados al N.

a) Determinación de las temperaturas T_{se} y $T_{sol-aire}$

La metodología desarrollada para calcular la temperatura superficial externa considerando el cálculo de la temperatura equivalente sol-aire se resume en el diagrama de flujo representado en la Figura 5-8. Partiendo de los datos de localización del edificio (Tabla 4.ii), se calcula I_t para muros orientados al N usando el modelo de cielo claro (§4.3.1) (**Paso 1**). Luego, se estima $T_{sol-aire}$ mediante la Ec. (2.1) (**Paso 2**) agregando la información de T_i y T_e . En forma paralela, se simula numéricamente la distribución de temperatura en el interior de la pared producida por una variación sinusoidal de la $T_{sol-aire}$. Una vez que el código de simulación es validado comparando exitosamente los resultados numéricos y teóricos (estos últimos obtenidos aplicando el método de la admitancia), puede simularse numéricamente la evolución del flujo de calor q y la temperatura T a través del muro usando la $T_{sol-aire}$ (**Paso 3**) como se describe en la próxima sub-sección. A continuación, se determina T_{se} usando la Ec. (4.30) (**Paso 4**). Finalmente, se comparan los valores teóricos de T_{se} con los proporcionados por la TTIR (**Paso 5**). Si ellos coinciden, $T_{se} = T_{se}(t)$ queda establecida (**Paso 6**).

Los puntos experimentales de la Figura 5-9 representan la temperatura T_{se} medida con cámara termográfica en los sectores e intervalos temporales antes mencionados. Estas mediciones se comparan con la evolución de $T_{sol-aire}$ obtenida analíticamente (§4.3) y T_e proporcionada por la estación meteorológica. Las diferencias entre $T_{sol-aire}$ y T_e son importantes, especialmente cerca del

mediodía en invierno, primavera y otoño ($\Delta T_{max} = [T_{sol-aire} - T_e]_{max} \approx 22^\circ\text{C}$ en invierno – Figura 5-9d; $\Delta T_{max} \approx 12^\circ\text{C}$ en verano – Figura 5-9b). ΔT_{max} cambia con las estaciones debido a las variaciones de I_t y el ángulo de incidencia θ de los rayos solares sobre una pared vertical en el sitio de la construcción. Para una pared orientada al N en la latitud 37.32°S , los rayos solares caen casi tangencialmente sobre la pared en verano y casi perpendicularmente en los mediodías del invierno, resultando una más grande incidencia de la radiación solar en invierno. Los valores de $T_{sol-aire}$ son más próximos a los medidos T_{se} que a T_e debido a que su cálculo considera el calentamiento solar. No obstante, como se infiere de Ec. (4.30), puede existir una diferencia significativa entre $T_{sol-aire}$ y T_{se} para valores grandes de $q_e R_{se}$.

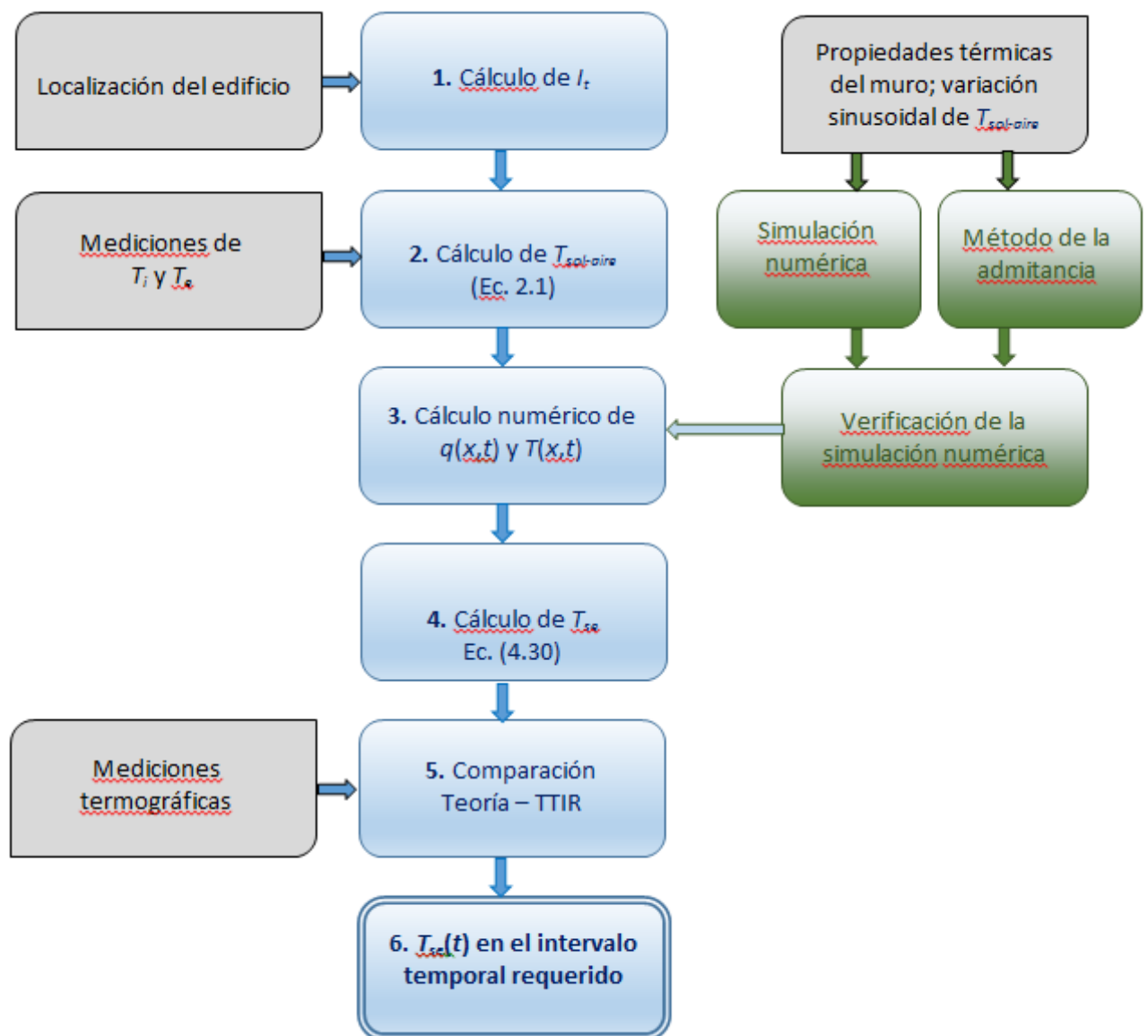


Figura 5-8: Diagrama de flujo de la metodología para encontrar la temperatura superficial externa considerando el cálculo de la temperatura equivalente sol-aire.

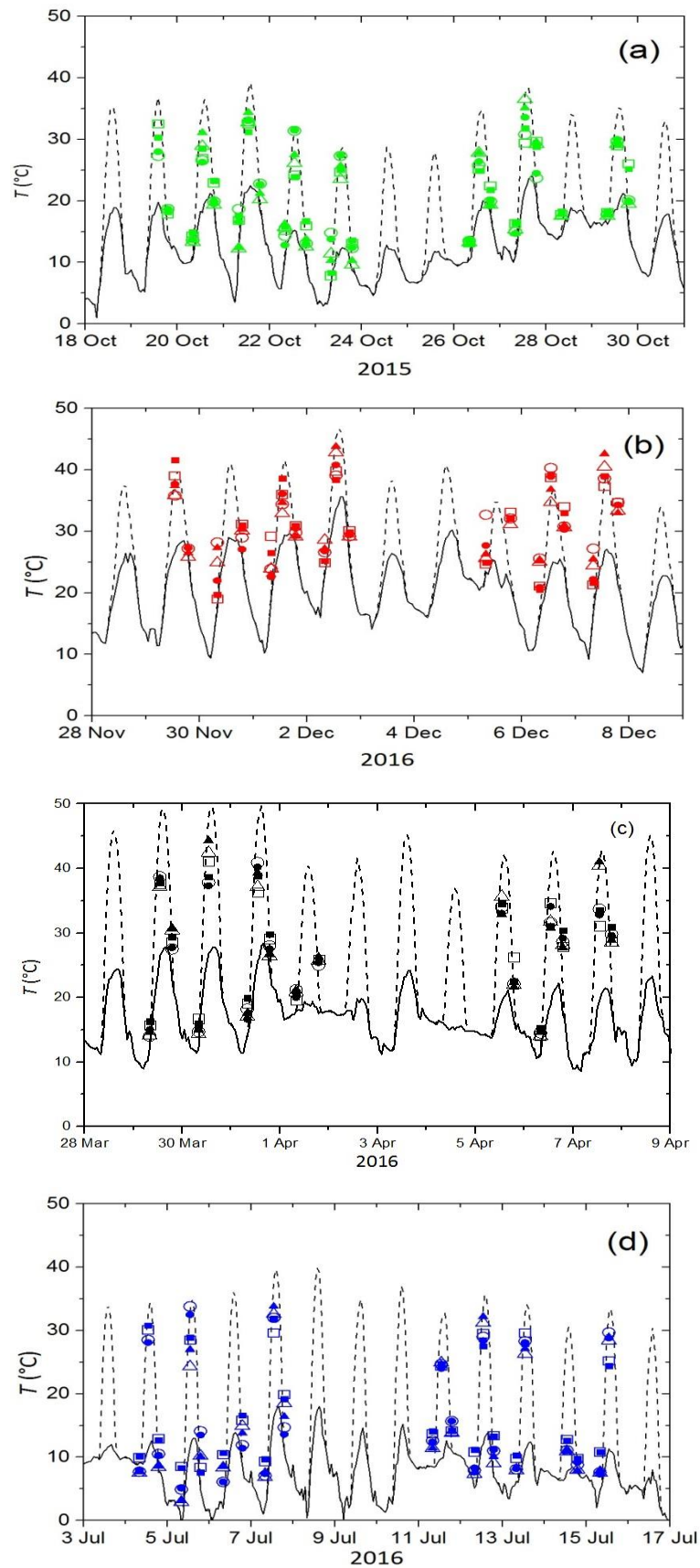


Figura 5-9: Evolución de T_e (líneas continuas) y $T_{sol-aire}$ (líneas de trazos) en primavera (a), verano (b), otoño (c) e invierno (d). Los símbolos representan las mediciones de T_{se} correspondientes a los sectores 7 (cuadrados), 32 (círculos) y 3 (triángulos) en PB (símbolos cerrados) y PA (símbolos abiertos).

b) Cálculo numérico del flujo de calor y la temperatura a través de la pared

El Paso 3 (Figura 5-8) consiste en determinar el flujo de calor a través de las capas de aire superficiales resolviendo numéricamente la Ec. (4.10) en el caso en el que la pared está expuesta a las temperaturas $T_{sol-aire}$ y T_i . La temperatura $T(x,t)$ y el flujo de calor $q(x,t)$ obtenidos en el dominio completo para uno de los intervalos analizados se muestran en la Figura 5-10. Como ya fue indicado, el flujo de calor $q(x,t)$ a través de la pared evoluciona en forma diferente de aquel en el estado estacionario, ya que depende de la distribución de temperatura y de su evolución en el interior de la pared. Como resultado, los valores extremos máximos y mínimos de $q(x,t)$ se observan sobre la superficie exterior (Figura 5-10b), evidenciando el intenso intercambio de calor entre la pared externa y su entorno. Durante el día, la pared absorbe una gran cantidad de calor debido a la radiación solar, que se manifiesta en la notoria diferencia entre $T_{sol-aire}$ y T_e (Figura 5-10a). Tal cantidad de calor es devuelta al ambiente durante la noche, como lo evidencia los mínimos de q_e observados en la Figura 5-10b.

Una vez que se determina q_e , se calcula T_{se} instante a instante por medio de la Ec. (4.30) (Paso 4, Figura 5-8). Cuando el ambiente entrega calor a la pared ($q_e > 0$), resulta que $T_{se} < T_{sol-aire}$. Cuando el flujo está en su máximo (Figura 5-10b), se alcanzan diferencias de temperatura de hasta 6°C. Por el contrario, cuando la pared entrega calor al ambiente, resulta que $T_{se} > T_{sol-aire}$ y la diferencia de temperatura alcanza unos 4°C cuando el flujo está en su mínimo (Figura 5-10b). Los valores máximo y mínimo de q_e varían con la estación del año. La diferencia $T_{sol-aire} - T_{se}$ puede alcanzar hasta 8°C a mediodía en primavera y otoño, y hasta -6°C durante las noches de invierno como se muestra en la Figura 5-11. Los valores de T_{se} calculados de este modo son comparados con aquellos medidos usando TTIR, obteniéndose un buen acuerdo como ilustra la Figura 5-12 (Paso 5, Figura 5-8). De este modo son convalidados los valores de T_{se} pudiéndose usar en otros cálculos.

5.4 Solución numérica de la ecuación del calor

5.4.1 Muro 1: doble pared con aislante central

Para [verificar](#) el código de simulación, se determina la respuesta dinámica de dos muros a partir de los resultados numéricos (§4.4.1) cuando las paredes se exponen a una temperatura que varía sinusoidalmente con periodo $P = 24$ h. Los resultados así obtenidos se comparan con aquellos del método de la admitancia (§4.2). Esta verificación se representa en la rama derecha de color verde en el diagrama de flujo mostrado en la Figura 5-8.

Las propiedades térmicas de los materiales involucrados se presentan en la Tabla 3.ii y como “muro 1” en la Tabla 5.vi. En esta última también se indican la difusividad y los intervalos temporales Δt obtenidos con la Ec. (4.59) con $C_d = 1$ y $\Delta x = \ell/100 = 0.003$ m para los diferentes materiales. Para

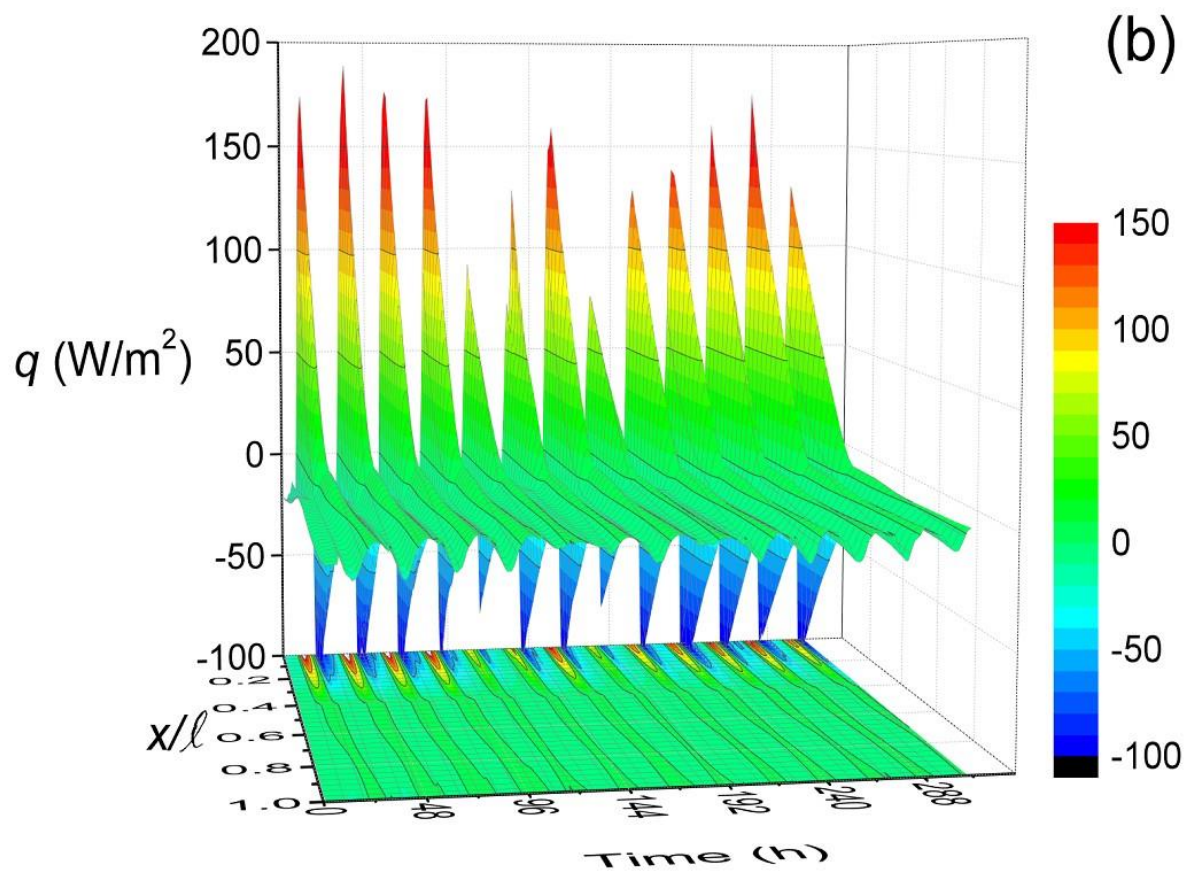
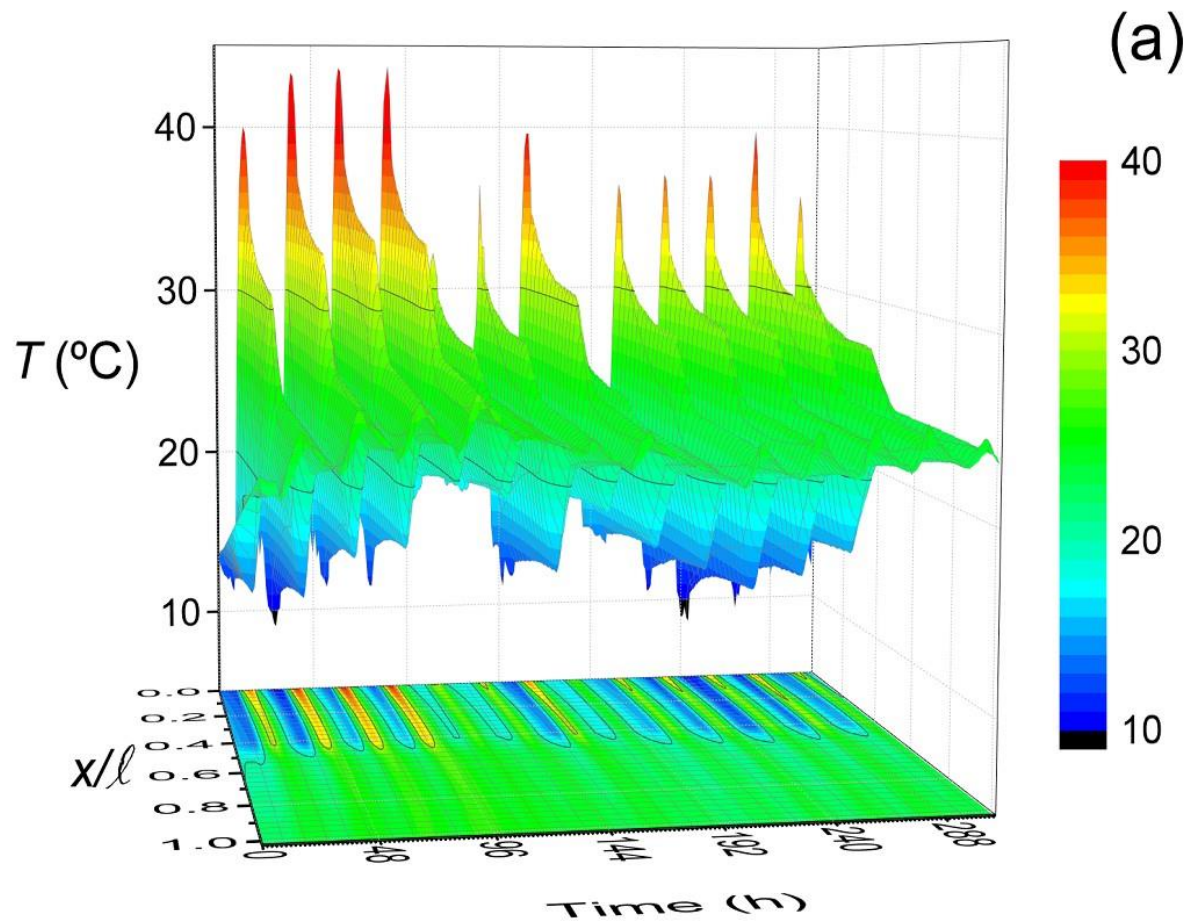


Figura 5-10: Distribución espacio-temporal de (a) la temperatura y (b) el flujo de calor correspondiente al intervalo comprendido entre el 29 Marzo y 7 Abril 2016 (otoño).

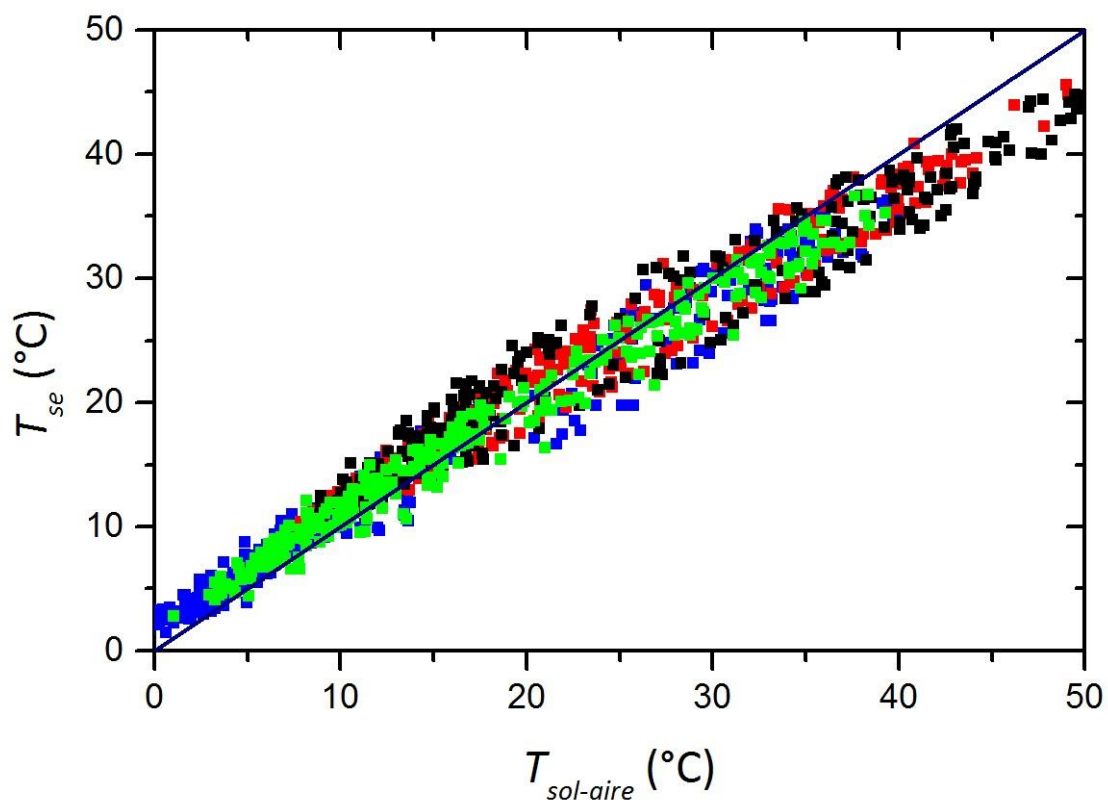


Figura 5-11: Temperatura superficial externa calculada numéricamente en función de la temperatura sol-aire en los intervalos 19–30 Octubre 2015 (símbolos verdes), 29 Marzo a 7 Abril 2016 (símbolos negros), 4–15 julio 2016 (símbolos azules) y 29 Noviembre a 7 Diciembre 2016 (símbolos rojos). La línea $T_{se} = T_{sol-aire}$ se agrega a los efectos de comparación.

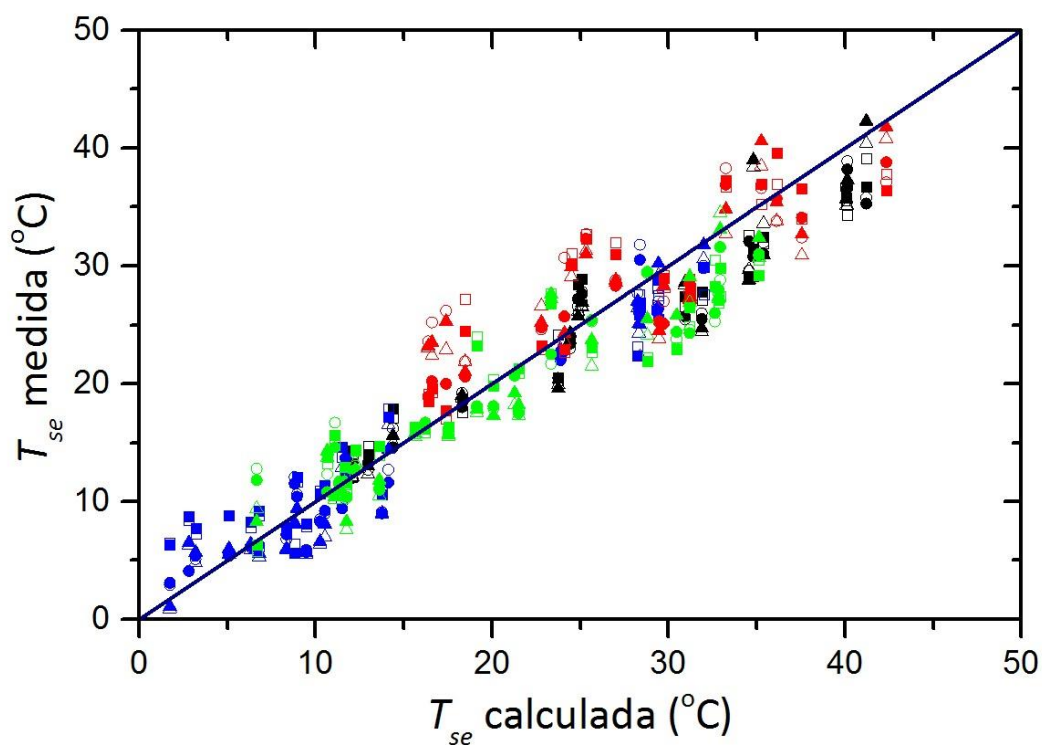


Figura 5-12: Temperatura superficial externa medida con la cámara termográfica en función de aquella calculada a partir de T_{so} y q_e obtenidos numéricamente. El código de uso de los colores es el mismo que el de la Fig. 5-12. (■: 7-PB, □: 7-PA, ●: 32PB, ○: 32PA, ▲: 3PB, △: 3PA). La línea $T_{se\text{ medida}} = T_{se\text{ calculada}}$ se agrega a los efectos de comparación.

	R (m ² °C/W)	e (m)	k (W/m°C)	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg°C)	D (m ² /s)	Δt_{max} (s)
R_{se}	0.04						
Ladrillo macizo	0.15	0.120	0.81	1600	1000	5.1×10^{-7}	18.0
PEE	1.00	0.0370	0.037	17	1700	1.3×10^{-6}	7.1
Ladrillo hueco	0.40	0.120	0.30	800	920	4.5×10^{-7}	20.2
Revoque grueso	0.02	0.020	0.93	1400	1050	6.3×10^{-7}	14.4
Revoque fino	0.01	0.005	0.70	1400	1012	4.9×10^{-7}	18.5
R_{si}	0.13						
Total	$R_T = 1.75$	$\ell = 0.30$					

Tabla 5.vi: Propiedades del muro 1 evaluado.

ejecutar el programa, se toma el menor de los intervalos ($= 7.1$ s) y $C_d = 0.5$. Si el flujo de calor es estacionario, resulta que su valor máximo $q_{ss|_{max}} = q_j$ para $j = 1, 2, \dots, N$ es uniforme, y por lo tanto

$$q_{ss|_{max}} = \frac{1}{R_T} (T_e - T_i)_{max} = 5.9 \text{ W/m}^2, \quad (5.4)$$

y la diferencia de temperatura máxima en cada capa de material es

$$\Delta T_{max} = \frac{R}{R_T} (T_e - T_i)_{max}. \quad (5.5)$$

Interesa analizar la respuesta dinámica del muro cuando se lo somete a una diferencia de temperatura que varía sinusoidalmente con un periodo de 24 h. Se adopta $T_i = 20^\circ\text{C} = \text{const}$ y una fluctuación diurna de $\pm 10^\circ\text{C}$. Así,

$$T_e(t) = 20^\circ\text{C} + 10^\circ\text{C} \sin(2\pi t / 24), \quad (5.6)$$

aunque los resultados se generalizan fácilmente para cualquier valor de T_i y de la amplitud de la fluctuación de temperatura, ya que el flujo de calor sólo depende de los gradientes de temperatura y no de los valores absolutos. Los resultados de la simulación numérica se muestran en la Figura 5-13. La distribución de temperatura presenta cambios bruscos sobre la interface externa (donde T_e cambia a T_{se}) y entre el ladrillo visto y el PEE ($x/\ell = 0.12/0.3 = 0.4$) debido a la significativa diferencia entre los valores de las propiedades de los materiales encontrados a ambos lados de esas interfaces. En cambio, a lo ancho del muro, q varía suavemente desde la pared externa, básicamente por conservación de la energía como se mencionó en §4.2.1.

Los valores máximos de temperatura y flujo de calor para distintas posiciones en el interior del muro se muestran en la Figura 5-14. Se observa que q_{max} decae casi linealmente desde su valor más grande ($\approx 81 \text{ W/m}^2$) en la cara externa del muro hasta un valor muy pequeño ($\approx 4.7 \text{ W/m}^2$) cuando alcanza al PEE en $x/\ell = 0.40$; a partir de esta posición, q_{max} sigue decayendo hasta su valor mínimo ($\approx 1.9 \text{ W/m}^2$) en la cara interna. Por otra parte, como era de esperar, se observan cambios bruscos en el

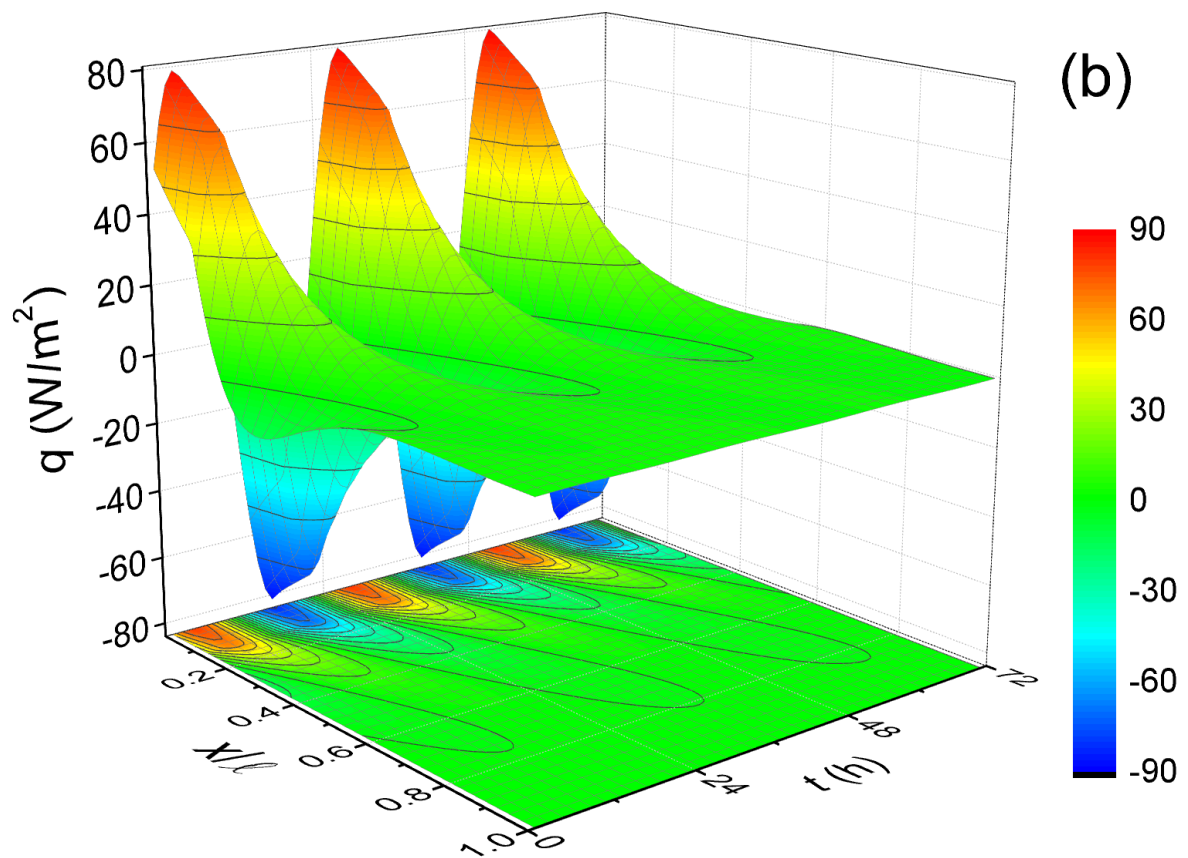
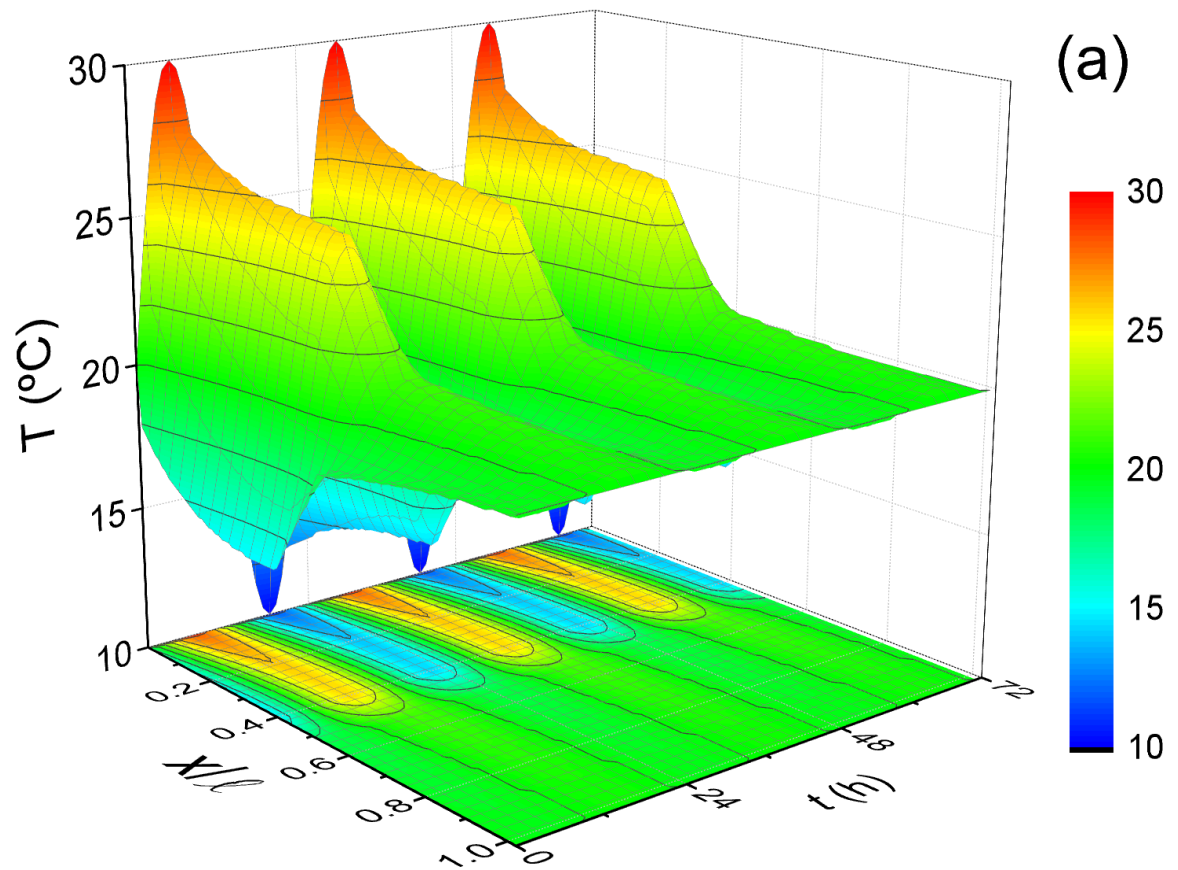


Figura 5-13: Distribución espacio-temporal de (a) la temperatura y (b) el flujo de calor por unidad de área cuando se somete el Muro 1 a una variación sinusoidal de temperatura externa.

gradiente de temperatura cuando la conductividad del medio cambia abruptamente (Ec. 4.6). El cambio de temperatura en la capa de aire superficial es importante ya que R_{se} es muy diferente de aquella de la primera capa (ver Tabla 5.vi) y el flujo de calor alcanza su máximo allí. Este q_{max} es consistente con un cambio brusco de temperatura en la superficie, mucho mayor que el encontrado en el régimen estacionario. En efecto, como q_{ss} es uniforme, la variación de temperatura en el régimen estacionario es mínima en la capa superficial externa y tres veces más grande en la capa interna debido al diferente valor de R_s ($R_{se} = 0.04$ y $R_{si} = 0.13$). La comparación entre la ordenada de la línea horizontal verde y la de los puntos verdes (Figura 5-14) sugiere que una cantidad de calor mucho mayor que q_{ss} es intercambiado entre el ambiente exterior y el ladrillo visto. El flujo de calor no estacionario es similar a q_{ss} a través del aislante, pero mucho menor a través del ladrillo hueco.

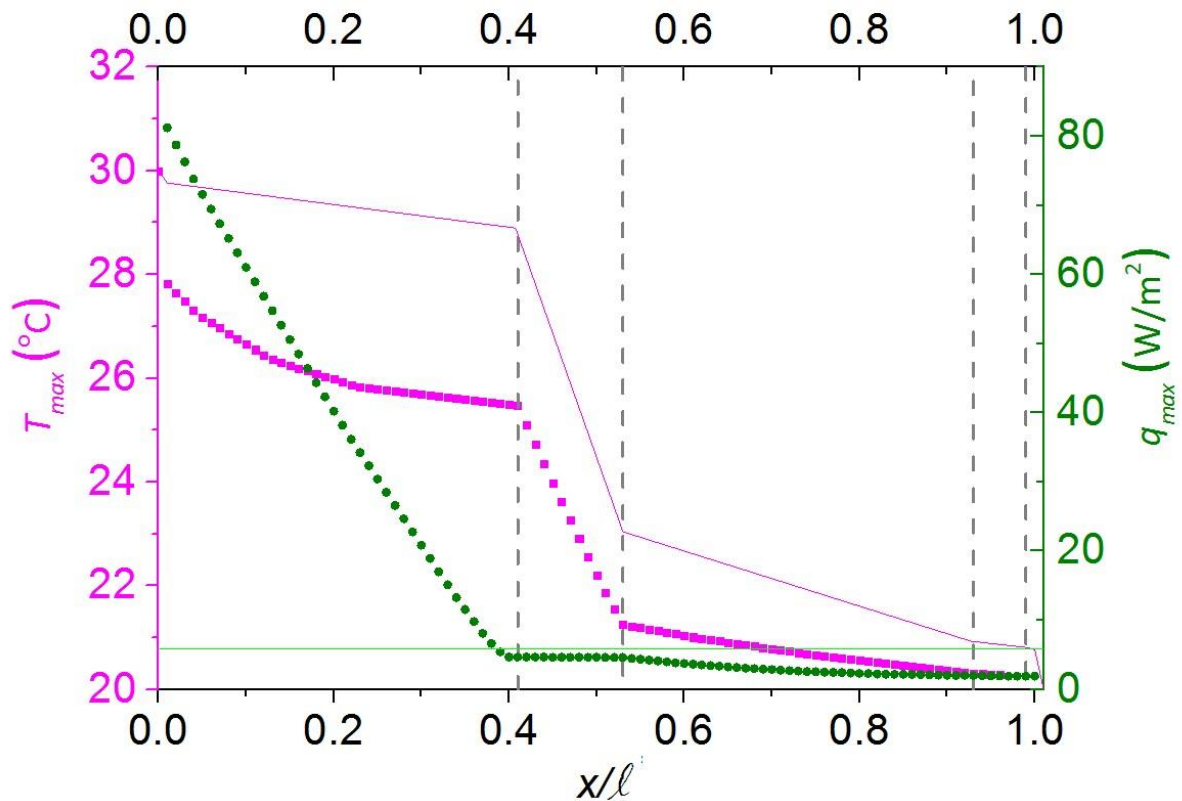


Figura 5-14: Perfiles espaciales de temperatura (magenta) y flujo de calor (verde) máximos en el muro 1 resultantes de la simulación numérica (puntos) y correspondientes soluciones en el régimen estacionario (líneas continuas).

La Figura 5-15 muestra la evolución de la temperatura (a) y del flujo de calor (b) a través de las interfaces internas de la pared esquematizada en la Figura 5-5a. Como era de esperar, la Figura 5-15a muestra diferencias significativas entre la evolución de $T_{sol-aire}$ (línea negra), T_{se} (línea roja), la temperatura en $x = 0.12$ m (entre el ladrillo sólido y el PEE – línea azul) y la temperatura en $x = 0.16$ m (entre el PEE y el ladrillo hueco– línea magenta) debido al cambio considerable de las propiedades (i.e. ρ , C_p , k) de los materiales localizados a ambos lados de las respectivas interfaces. Como

resultado, las temperaturas en el borde interno del ladrillo hueco ($x = 0.28$ m) y en los revoques casi igualan a T_i . También se nota un retraso de las variaciones que es importante ya luego de atravesar la capa superficial de aire externa. Los retrasos totales experimentados por T y q , luego de atravesar todo el muro, son similares.

La Fig. 5-15b confirma lo que muestra la Figura 5-14, en cuanto a que el flujo de calor q_e intercambiado entre el exterior y el muro (línea negra) es importante; este efecto crea la diferencia entre las curvas de $T_{sol-air}$ y T_{se} observadas en Fig. 5-15a. Desde la superficie exterior ($x/\ell = 0$), $q(x)$

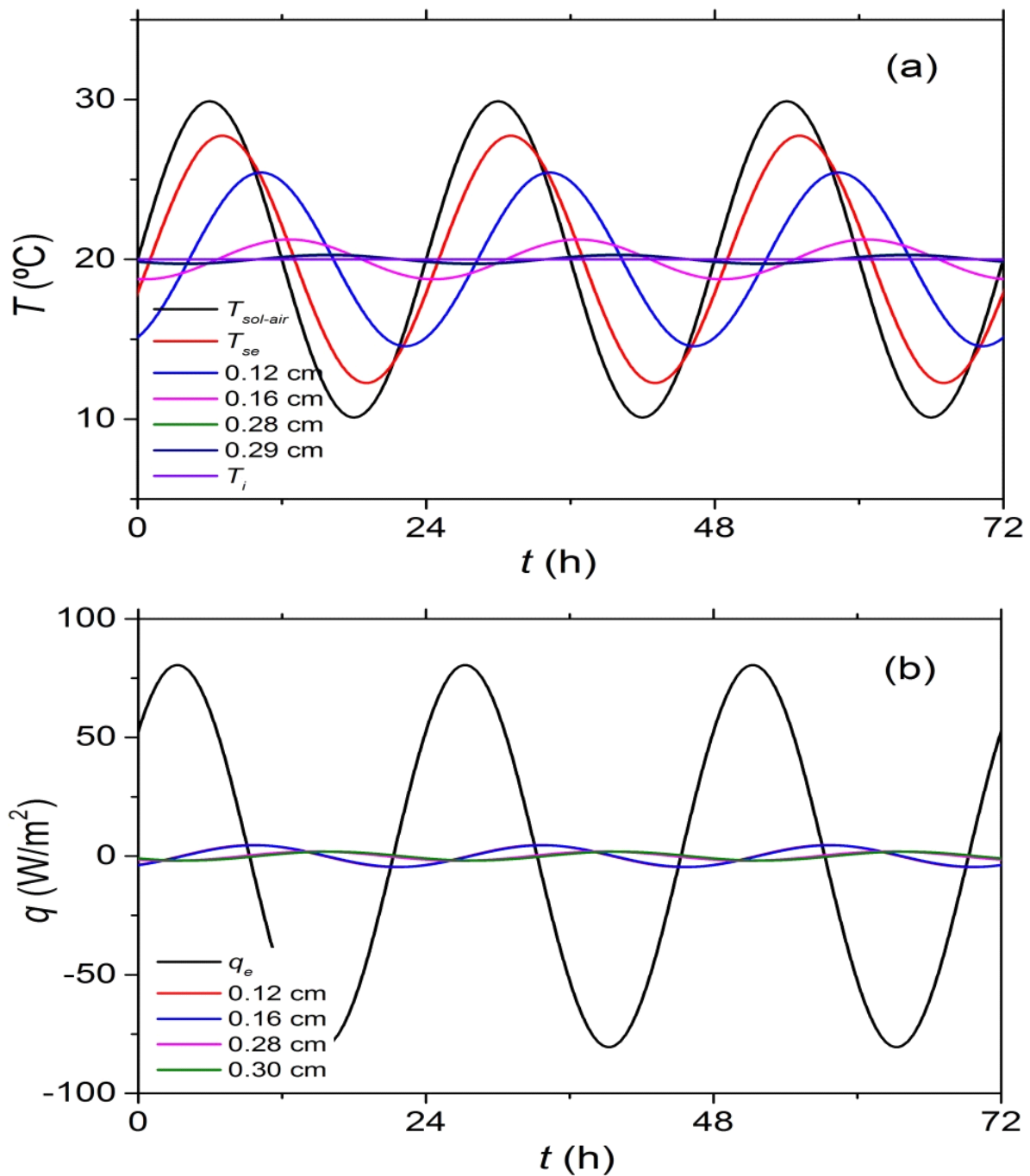


Figura 5-15: Evolución de temperatura (a) y flujo de calor (b) en las interfaces entre los materiales que componen el muro 1.

varía con continuidad a través de toda la pared (línea verde de puntos en Figura 5-14), con una notoria disminución hasta la primera interface interna. En consecuencia, solo una pequeña fracción de q_e se transfiere al interior. Este intercambio de calor difiere significativamente del logrado cuando se considera un flujo estacionario y concuerda con los resultados obtenidos con el método de la admitancia (Fig. 5-6c).

De particular interés resulta encontrar la evolución de la posición del máximo de temperatura mostrado por la línea magenta en Figura 5-16. Al igual que en la Figura 5-15, esta línea indica que los máximos correspondientes a diferentes profundidades no se alcanzan al mismo tiempo como ocurriría bajo la hipótesis de régimen estacionario. Por el contrario, hay un retraso de unas 10 h entre los tiempos para los cuales se alcanzan los máximos en $x = 0$ y $x = \ell$. Lo que importa, sin embargo, es el retardo φ (Ec. 4.54) que surge de comparar la evolución de la temperatura en $x = 0$ y la del flujo de calor en $x = \ell$.

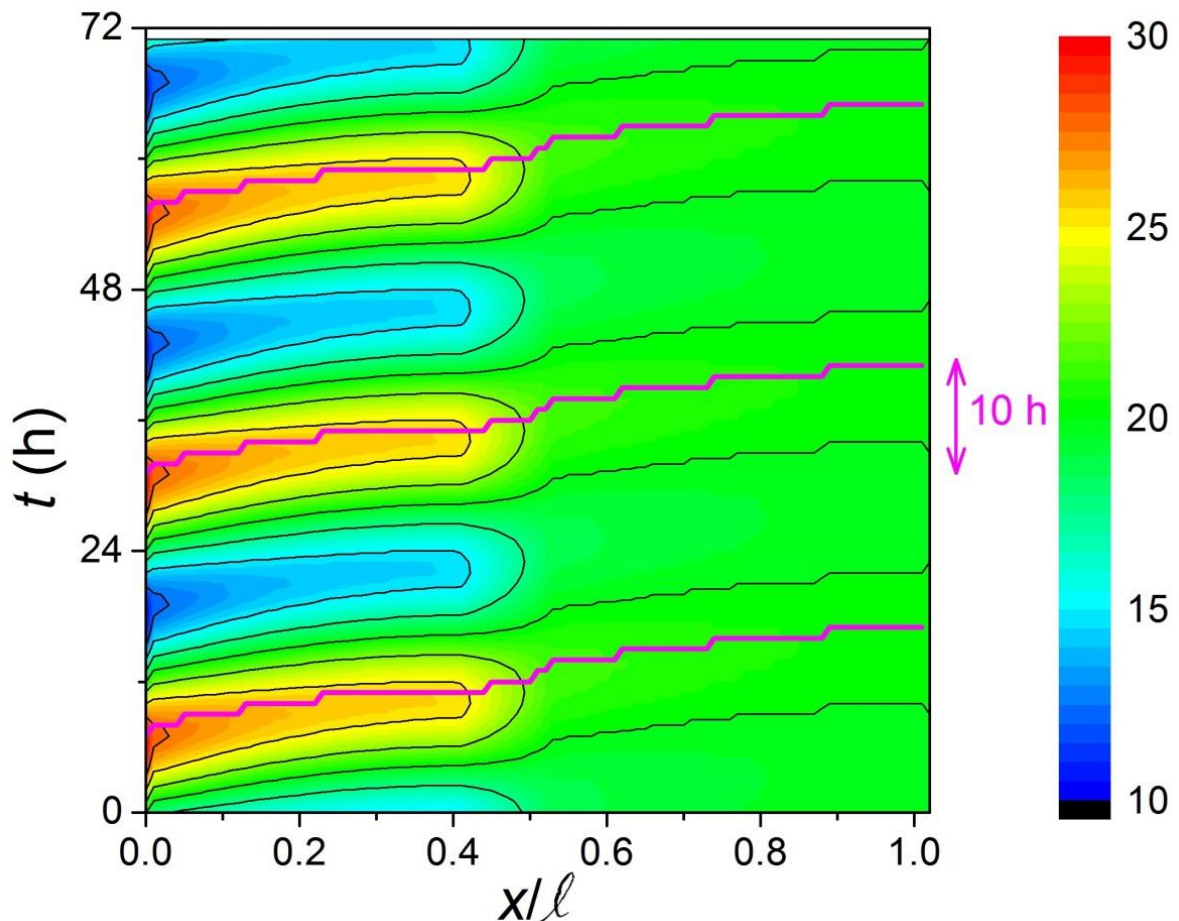


Figura 5-16: Gráfico de contorno de la distribución de temperatura mostrada en Fig. 5-13(a). La línea magenta indica la posición de los máximos de temperatura para distintas profundidades en la pared.

Aplicando el método de la admitancia para este muro, se encuentran los resultados presentados en la Tabla 5.vii. La admitancia obtenida de la simulación presenta el mayor error (5%), posiblemente por la falta de resolución espacial de la CC (4.59). De la comparación entre estos

resultados, y del cotejo detallado entre todos los resultados numéricos y teóricos (Figuras 5-6c y 5-15), puede concluirse que la solución numérica de la ecuación de difusión del calor representa razonablemente bien la transferencia de calor a través del muro 1.

	γ (W/m ² °C)	f	ϕ (h)	u (W/m ² °C)
Muro 1				
<i>Resultados numéricos y Ecs. (4.60)-(4.62)</i>	3.7	0.33	10	0.19
<i>Método de la admitancia</i>	3.9	0.32	10	0.17
Ladrillo hueco $\ell = 0.18$ m revocado				
<i>Resultados numéricos y Ecs. (4.60)-(4.62)</i>	3.4	0.62	5.5	0.99
<i>Método de la admitancia</i>	3.9	0.62	5.9	0.99

Tabla 5.vii: Verificación del código de simulación mediante los parámetros dinámicos de los dos muros evaluados.

5.4.2 Muro de ladrillo hueco revocado

A los efectos de comparar los resultados precedentes con los de otros muros, se analiza ahora un tipo de muro muy usado en Argentina como envolvente. Este es el construido con ladrillos huecos revocado en ambas caras, de 0.25 m de ancho total, cuyas características típicas se listan en la Tabla 5.viii. Como es usual, y a los efectos del cálculo de la transferencia de calor, el bloque cerámico se trata como un sólido continuo con valores promedios de densidad, capacidad calorífica y conductividad térmica de los alvéolos interiores y de los espacios vacíos. Con respecto al muro 1, este muro presenta principalmente una mayor conductividad y menores densidad y calor específico, además de tener un menor ancho total. En la última columna de Tabla 5.viii se consignan los intervalos temporales Δt para los diferentes materiales, calculados con Ec. (4.58) con $C_d = 1$ y $\Delta x = \ell / 100 = 0.0025$ m.

	R (m ² °C/W)	ℓ (m)	λ (W/m°C)	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg°C)	D x10 ⁻⁷ (m ² /s)	Δt (s)
R_{se}	0.04						
Revoque fino	0.01	0.005	0.7	1400	1012	4.9	18.5
Revoque grueso	0.02	0.020	0.9	1400	1050	6.3	14.4
Ladrillo hueco	0.4	0.200	0.5	800	920	6.8	22.4
Revoque grueso	0.02	0.020	0.9	1400	1050	6.3	14.4
Revoque fino	0.01	0.005	0.7	1400	1012	4.9	18.5
R_{si}	0.13						
Totales	$R_T = 0.63$	$\ell = 0.25$					

Tabla 5.viii: Propiedades del muro de ladrillos huecos revocado.

Los resultados de la simulación numérica (Figuras 5-17 y 5-18) muestran la disminución de q_{max} (línea de puntos verdes en Fig. 5-18) desde el contorno exterior. El flujo de calor ($\approx 9.9 \text{ W/m}^2$) que pasa a la cara interna del muro ($x/\ell = 1$) es menor que el que atraviesa la cara externa ($\approx 55.2 \text{ W/m}^2$), y también que q_{ss} (15.9 W/m^2 , línea verde horizontal en Fig. 5-18). Esta reducción del flujo de calor se debe a que el muro de ladrillos huecos transmite hacia el interior sólo parcialmente las variaciones temporales de la temperatura exterior. Así, la carga térmica de esta envolvente debida a la conducción del calor y calculada con la resistencia térmica en el régimen estacionario (esto es, con q_{ss}) también arroja un resultado diferente al encontrado cuando se considera la respuesta dinámica.

En la Figura 5-19 se representa la evolución de la temperatura y del flujo de calor en cada interface. Las curvas correspondientes a $x \geq 0.225 \text{ m}$ representan la evolución de los valores de T y q en las interfaces presentes entre el revoque grueso interior y la superficie interior. Se observa que la disminución de la amplitud de las variaciones es grande en ambos casos, y se detecta un cierto desfasaje de las fluctuaciones a distintas profundidades en la pared. De hecho, entre la evolución de T y q en el contorno interior (líneas verdes) hay una diferencia de fase $\varphi \approx 5.8 \text{ h}$ como muestra la Figura 5-20. Los valores de los parámetros dinámicos encontrados a partir de los resultados numéricos concuerdan razonablemente con aquellos obtenidos aplicando el método de la admitancia, como muestra la Tabla 5.vi.

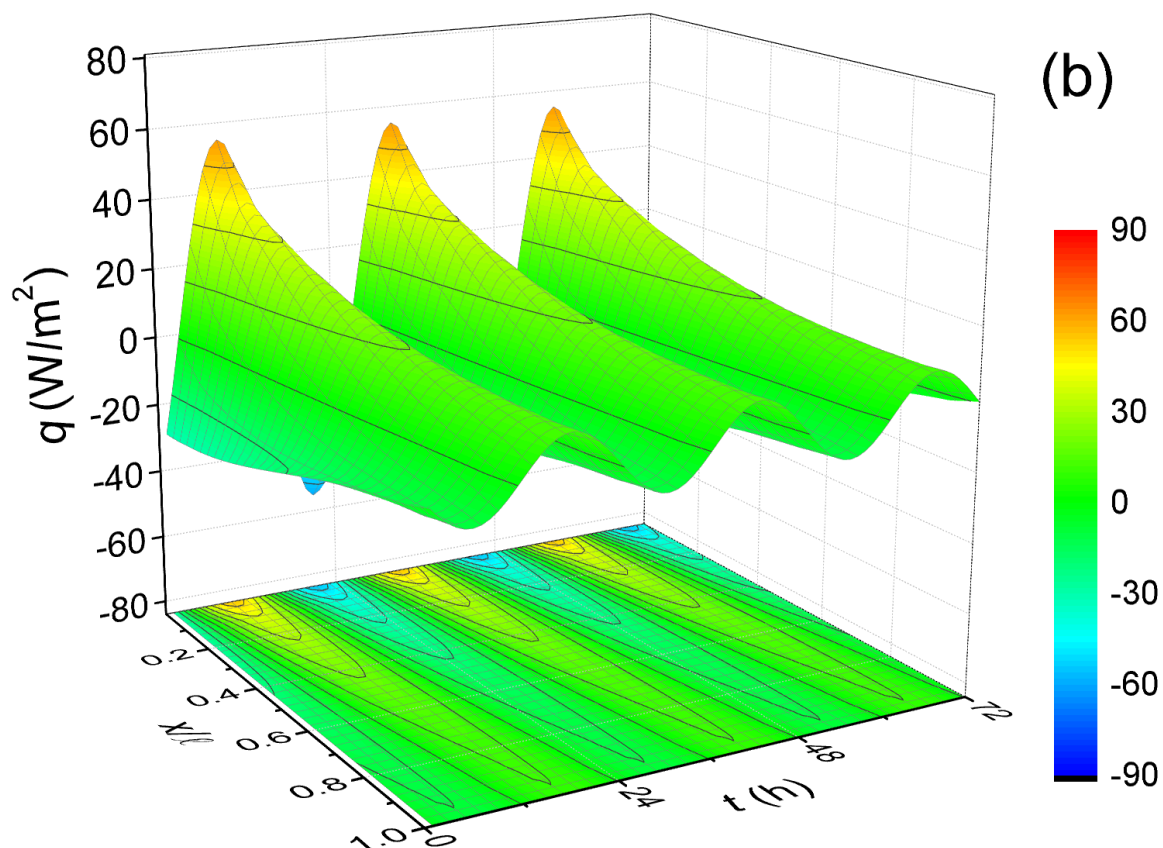
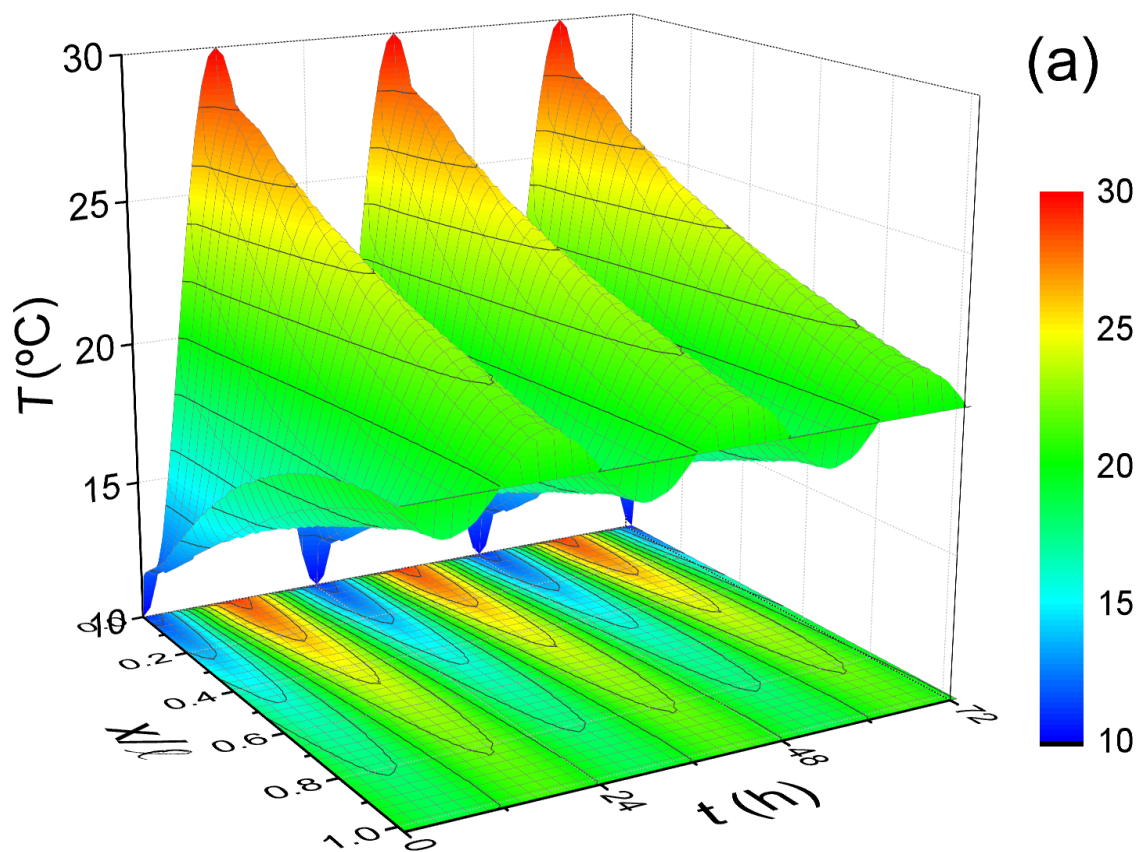


Figura 5-17: Distribución espacio-temporal de (a) temperatura y (b) flujo de calor por unidad de área del muro de ladrillos huecos revocado.

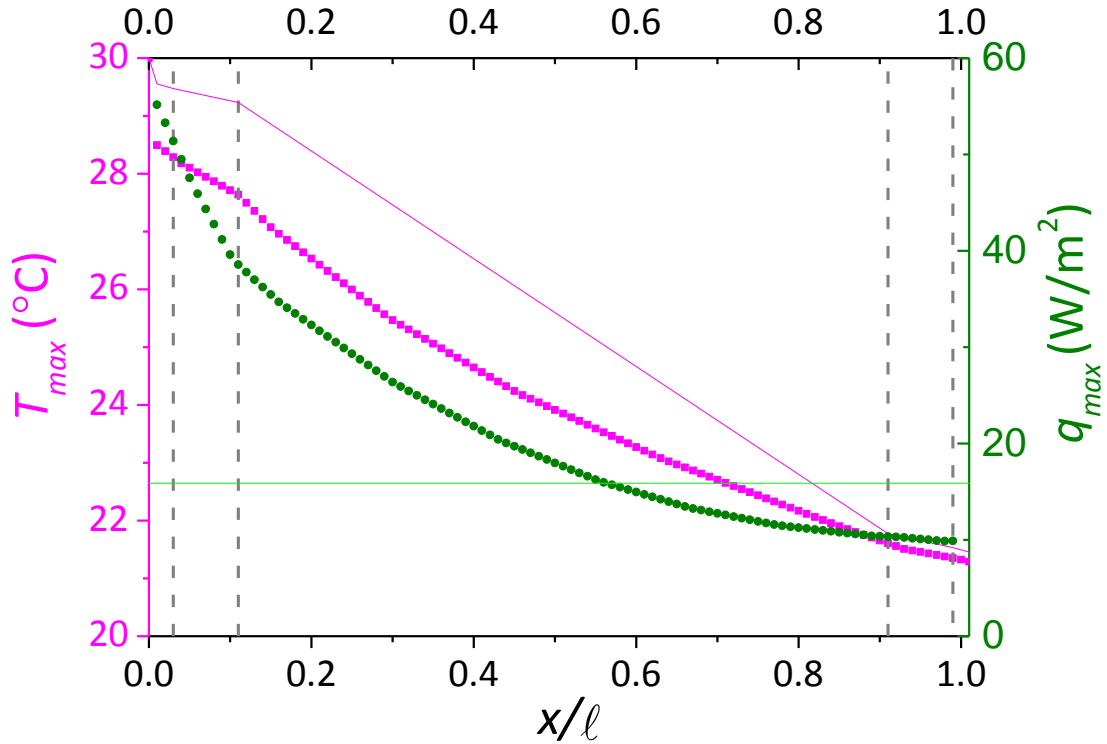


Figura 5-18: Perfiles espaciales de temperatura (magenta) y flujo de calor (verde) máximos en el muro de ladrillos huecos revocado resultantes de la simulación numérica (puntos) y correspondientes soluciones en el régimen estacionario (líneas).

5.4.3 Enfriamiento nocturno de los muros

Otro aspecto crítico a verificar en los resultados numéricos es el enfriamiento nocturno de los muros. Como se expuso en §4.4.2, el calentamiento diurno del interior del edificio se reduce durante la noche debido a la emisión de radiación IR de los objetos. El calentamiento solar de las partes de la envolvente orientadas al N es tan importante como el enfriamiento nocturno que las mismas experimentan por convección y conducción del calor acumulado al exterior. Sin embargo, el enfriamiento por emisión de radiación IR es fundamental para explicar la variación de la T_{se} de las paredes orientadas al S las cuales que no reciben radiación solar directa durante el día. Los resultados de la simulación numérica de la evolución de T_{se} se comparan con los valores obtenidos aplicando la TTIR as mediciones termográficas descritas en §3.2.2 y el modelo conceptual expuesto en §4.4.2. En este caso, se resuelve la Ec. (4.71) por diferencias finitas con $\Delta t = 1$ h, tomando como CI la temperatura medida con TTIR a la tarde/noche anterior (≈ 19 h). Luego de 13 horas se comparan los resultados con la T_{se} medida a la hora 8:00 del día siguiente.

Para mejorar la precisión de los cálculos asociados con el enfriamiento proporcionados por el modelo, es necesario especificar la parte del muro afectada. Para ello, se considera que la pared externa del muro está construida con ladrillos vistos, cada uno con masa $m_1 = 2.2$ kg y $C_p = 10^3$ J/Kg°C, dispuestos “a sogá” (Figura 5-21). En el centro del muro se disponen placas de PEE (Fig. 5-5a) con

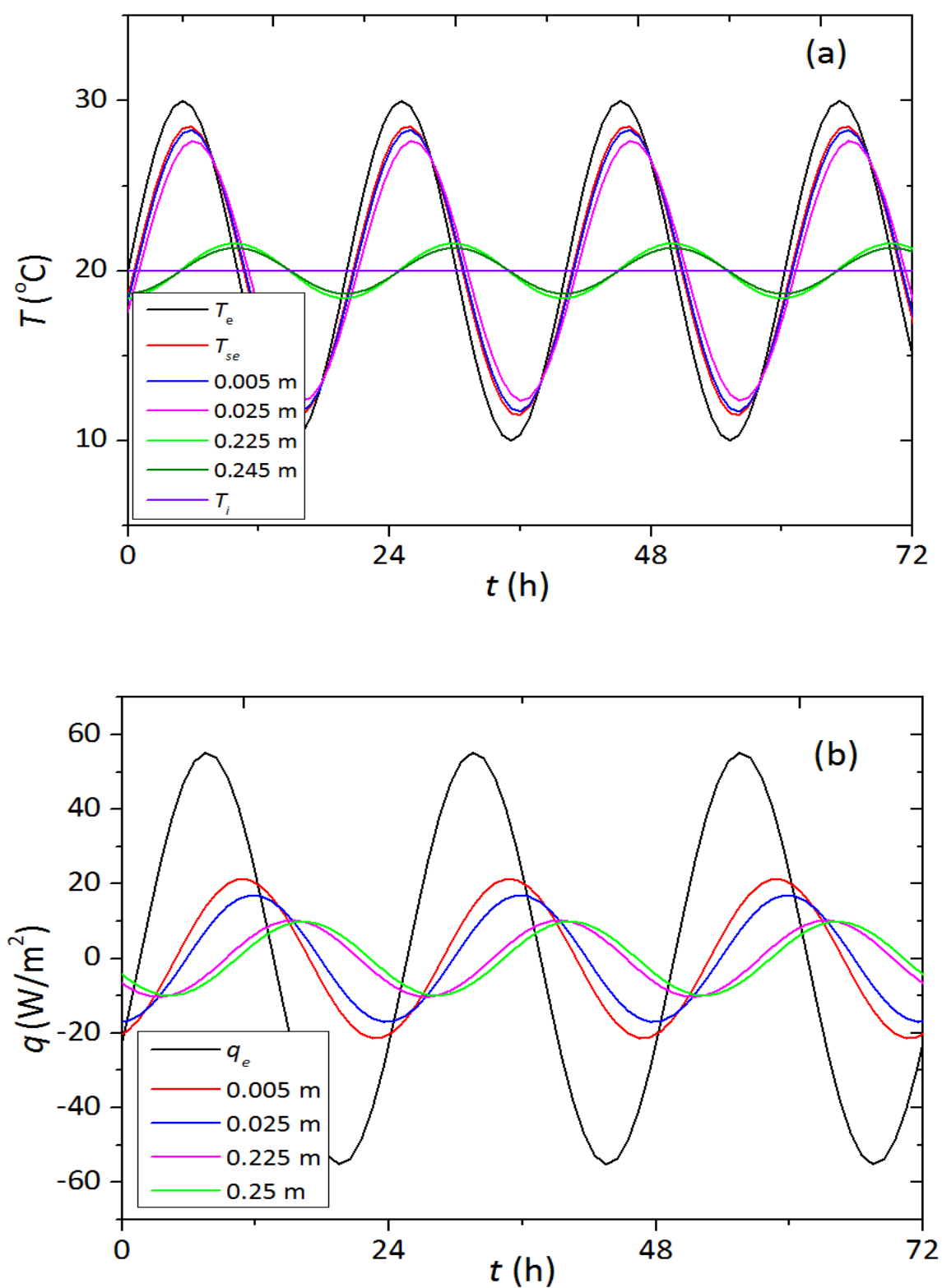


Figura 5-19: Evolución de temperatura (a) y flujo de calor (b) en las interfaces entre los materiales que componen el muro de ladrillos huecos revocado.

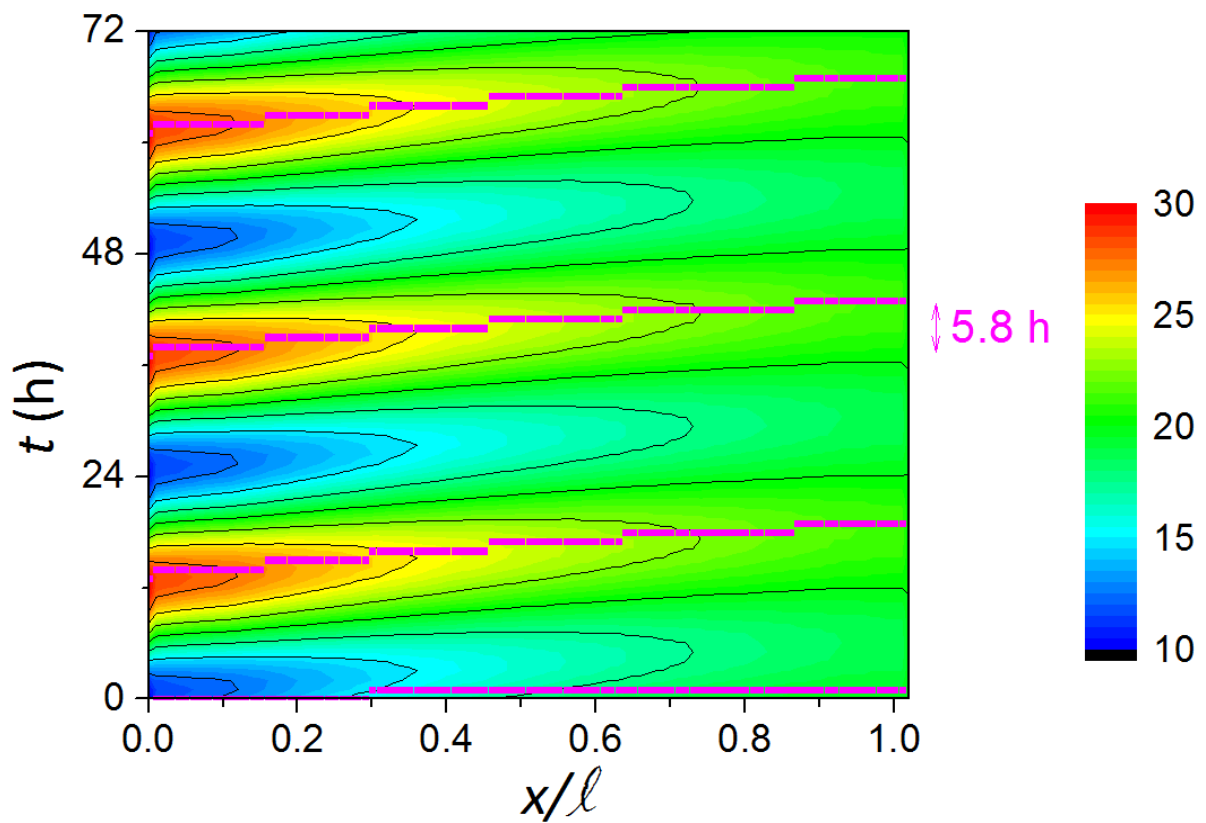


Figura 5-20: Gráfico de contorno de la distribución de temperatura. La línea magenta indica la posición de los máximos de temperatura a distintas profundidades en la pared.

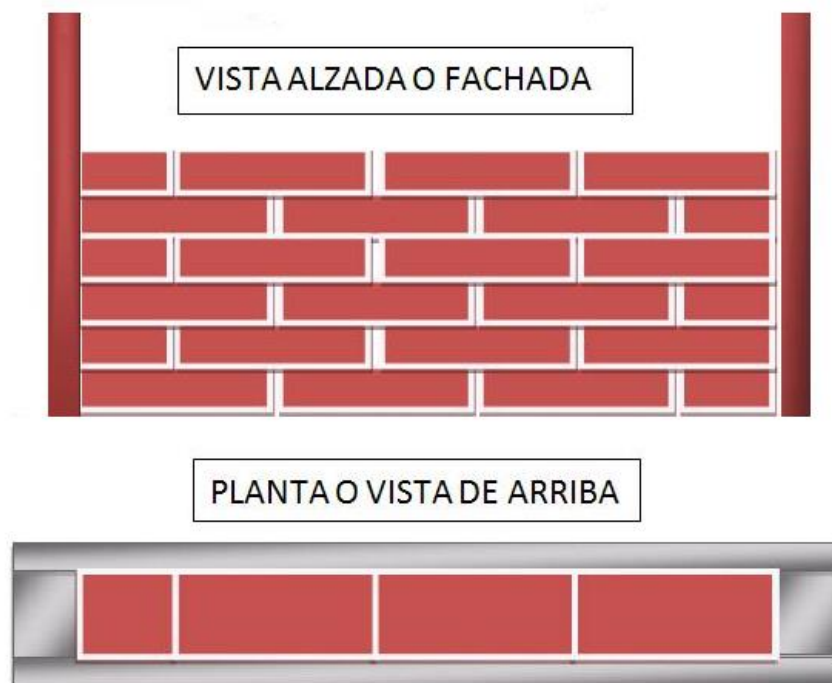


Figura 5-21: Disposición de los ladrillos vistos en un “muro a soga”.

baja conductividad térmica. Los resultados presentados en las Figuras 5-10, 5-13 y 5-14 muestran que la pared externa del muro puede considerarse aislada de la pared interna de ladrillos huecos, y expuesta a una temperatura $T_{se} \approx$ constante. En tal caso, el área emisora de radiación de cada ladrillo visto es $A_1 = 0.05 \times 0.23 \text{ m}^2$, valor que se introduce en el modelo teórico descrito en §4.4.2.

La Figura 5-22 ilustra la evolución de T_{se} obtenida resolviendo la Ec. (4.71) (línea magenta), con el código de simulación (línea continua azul) y a partir de las mediciones con TTIR en PB y PA (símbolos) en las diferentes estaciones del año. Por referencia, se incluye la evolución de T_e , T_i y $T_{sol-air}$ calculada con la Ec. (2.1). Se observa que T_e y $T_{sol-air}$ presentan una disminución pronunciada durante la noche que no es imitada por T_{se} . Sin embargo, los resultados de la simulación numérica y del modelo teórico concuerdan con los resultados de las mediciones realizadas la mañana siguiente. Luego, puede inferirse que la evolución de $T_{sol-air}$ no ofrece una buena aproximación del comportamiento de T_{se} . En consecuencia, resulta importante tener en cuenta tanto la masa térmica como la radiación nocturna para describir la evolución de T_{se} ya sea en el código numérico y, más sencillamente, en el modelo conceptual expuesto.

5.5 Aplicación del Método inverso

5.5.1 Aplicación del modelo de Regresión Lineal Simple (MRLS)

Se presentan en esta sección los resultados estadísticos de aplicar el modelo inverso desarrollado en §4.5 basado en la regresión lineal correspondiente a cada proceso físico. En primer lugar se procede al cálculo de los coeficientes a , b , c , d de las Ecs. (4.72) o (4.73) para la PB del edificio. La Figura 5-23 ilustra la dependencia del cambio temporal de la temperatura interna con la diferencia $(T_e - T_i)$. Se infiere que la combinación de variables elegidas conduce a una relación lineal en acuerdo con (4.72), aunque presenta una importante dispersión debido a otros efectos no contemplados en esa ecuación. La recta de mejor ajuste permite encontrar el tiempo de respuesta del edificio $\chi \approx 1/0.75 = 1.34$ y el coeficiente $d \approx 3.2$. Se observa también que no existe una diferencia notoria entre la tendencia de los registros diurnos y nocturnos implicando que el enfriamiento debido a la radiación nocturna (§5.4.3) no tiene un efecto significativo global sobre T_i y puede despreciarse en este análisis.

Para simplificar el análisis, se define la función auxiliar

$$f_1 = \frac{dT_i}{dt} - b(T_e - T_i) - d \quad (5.7)$$

y representa en función de I_t en la Figura 5-24 considerando sus valores en intervalos de 20 días (identificados con colores diferentes). Como no se aprecian diferencias entre los resultados obtenidos en estos intervalos, se infiere que la radiación y la captación solar del edificio fueron similares, en concordancia con los datos de las estaciones meteorológicas. De la recta de mejor

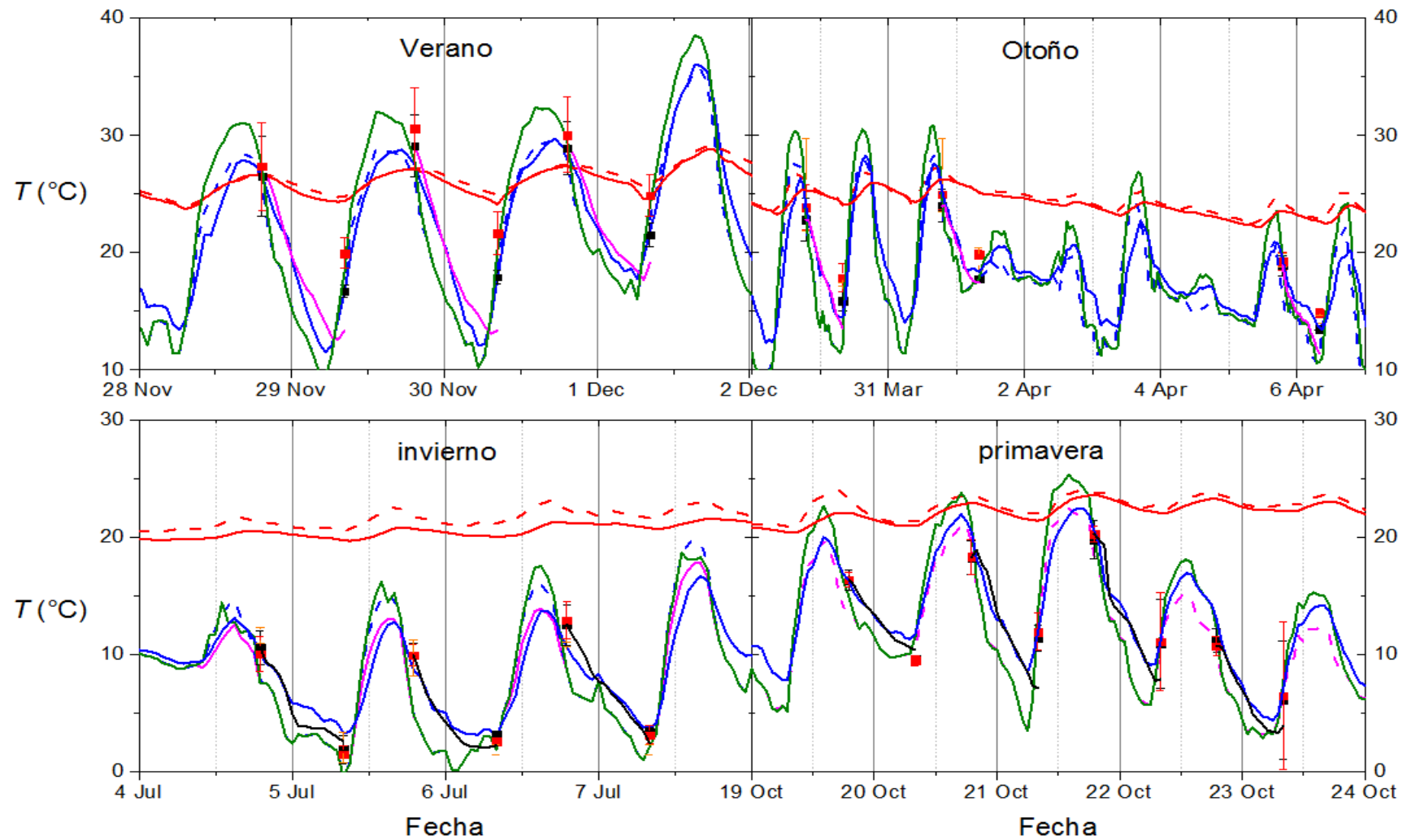


Figura 5-22: Evolución de T_{se} de los muros orientados al S obtenida con el modelo teórico (línea magenta) y con el código de simulación (línea continua azul). Los puntos representan el promedio de las mediciones en PB (negros) y PA (rojos); las barras de error muestran la desviación estándar del promedio. T_e , T_i y $T_{sol-aire}$ se representan con líneas de trazos azul, continua roja y continua verde respectivamente.

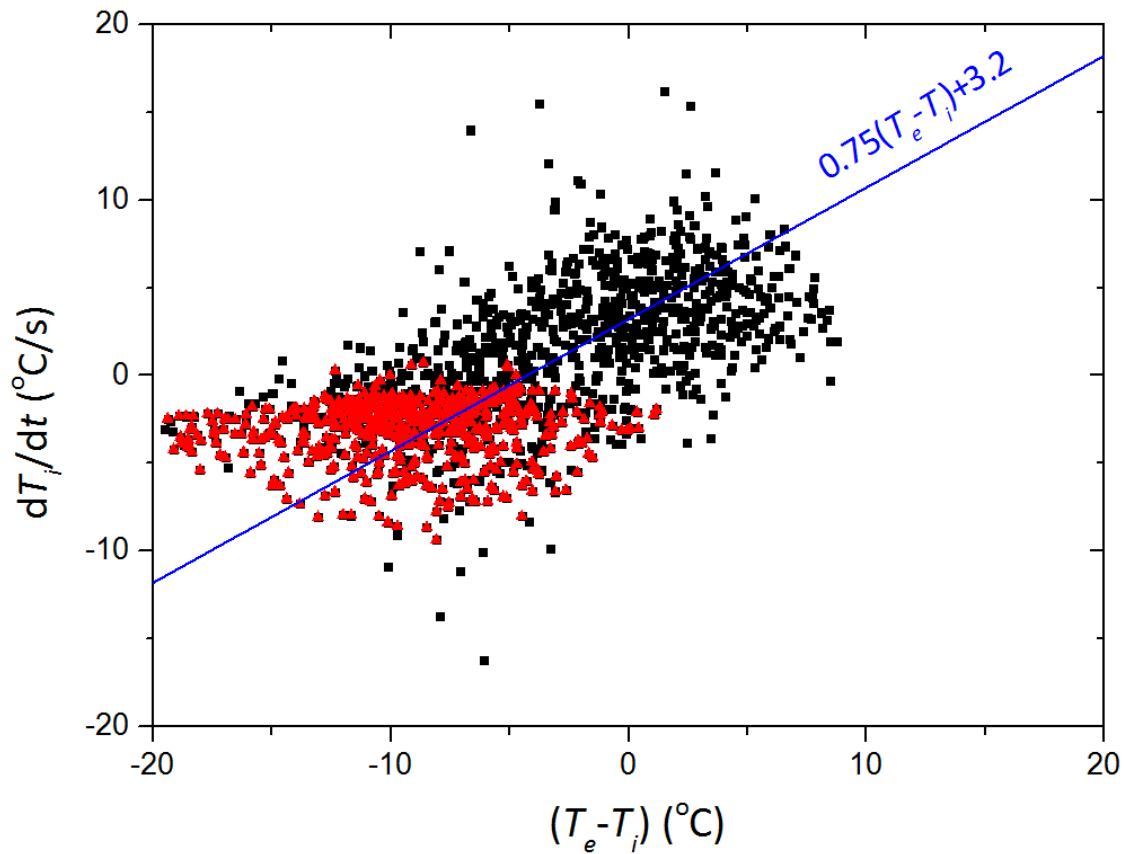


Figura 5-23: Derivada de la temperatura interior en función de la diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior para las medidas diurnas (cuadrados negros) y nocturnas (triángulos rojos). La recta es la que mejor ajusta a los puntos experimentales.

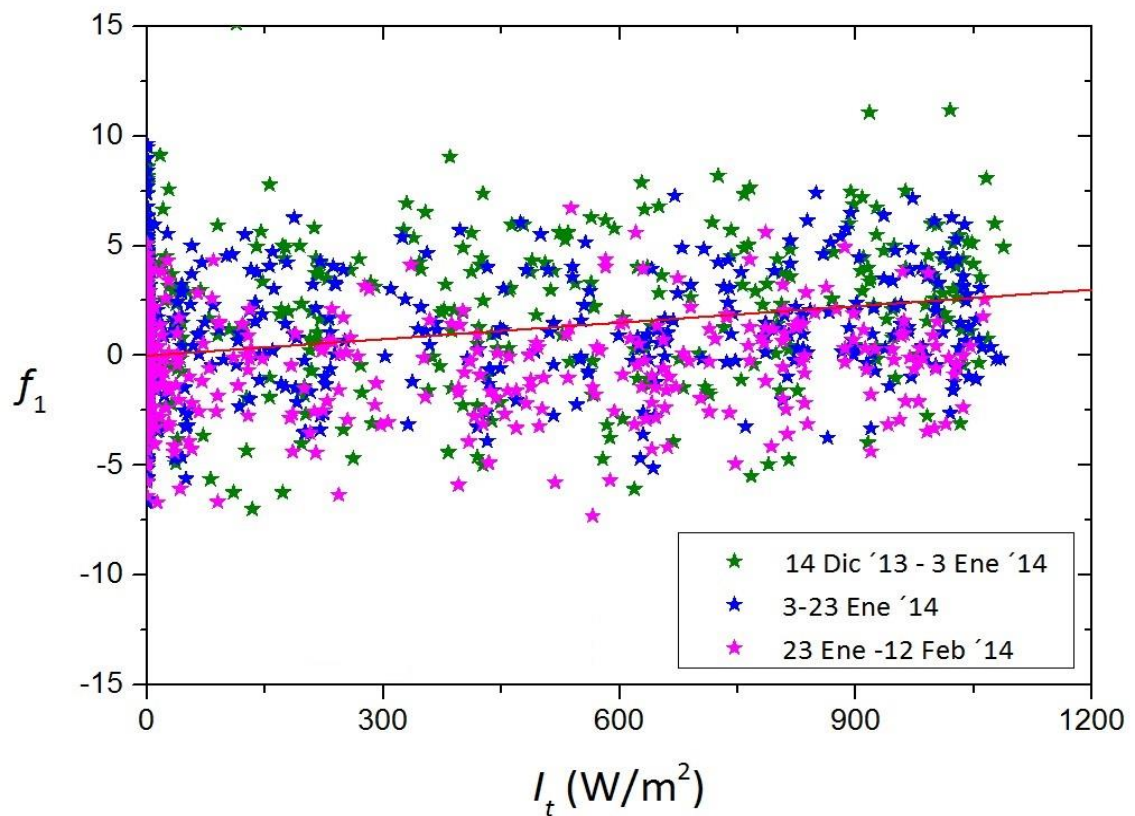


Figura 5-24: Variación de la función auxiliar f_1 con la intensidad de la radiación solar. La recta de mejor ajuste es $0.0025I_t$.

ajuste se determina que $a = 0.0025$. Análogamente, definiendo otra función auxiliar

$$f_2 = \frac{dT_i}{dt} - b(T_e - T_i) - al_t - d \quad (5.8)$$

y representándola gráficamente en función de la velocidad del viento (Figuras 5-25 y 5-26), nuevamente se obtiene una relación lineal acorde a las Ecs. (4.72) o (4.73). En ambos casos, la ordenada al origen no es nula. Comparando el ajuste y la dispersión observados en las Figuras 5-25 y 5-26, se deduce que la dependencia es ligeramente mejor con $v(T_e - T_i)$, aunque algún factor adicional deba introducirse para que la ordenada al origen sea nula y la dispersión de los puntos medidos resulte menor.

Para encontrar los coeficientes a , b , c , d de las Ecs. (4.72) o (4.73) para la PA del edificio se procede en forma análoga, encontrándose $b \approx 1.3$, $a \approx 0.025$, $c_2 \approx -0.05$ y $d \approx 3$. Luego, comparando con los resultados de la PB, se encuentra que la PA presenta:

- + mayores pérdidas por conducción (73%),
- + la misma ganancia por radiación, lo cual es razonable en vista de la simetría de las superficies vidriadas de PA y PB,
- + mayores pérdidas por convección (i.e., la PA está más expuesta a la acción del viento), y
- + mayor efecto de las fuentes internas puesto que el aire cálido tiende a acumularse en la parte superior independientemente del lugar donde se genera.

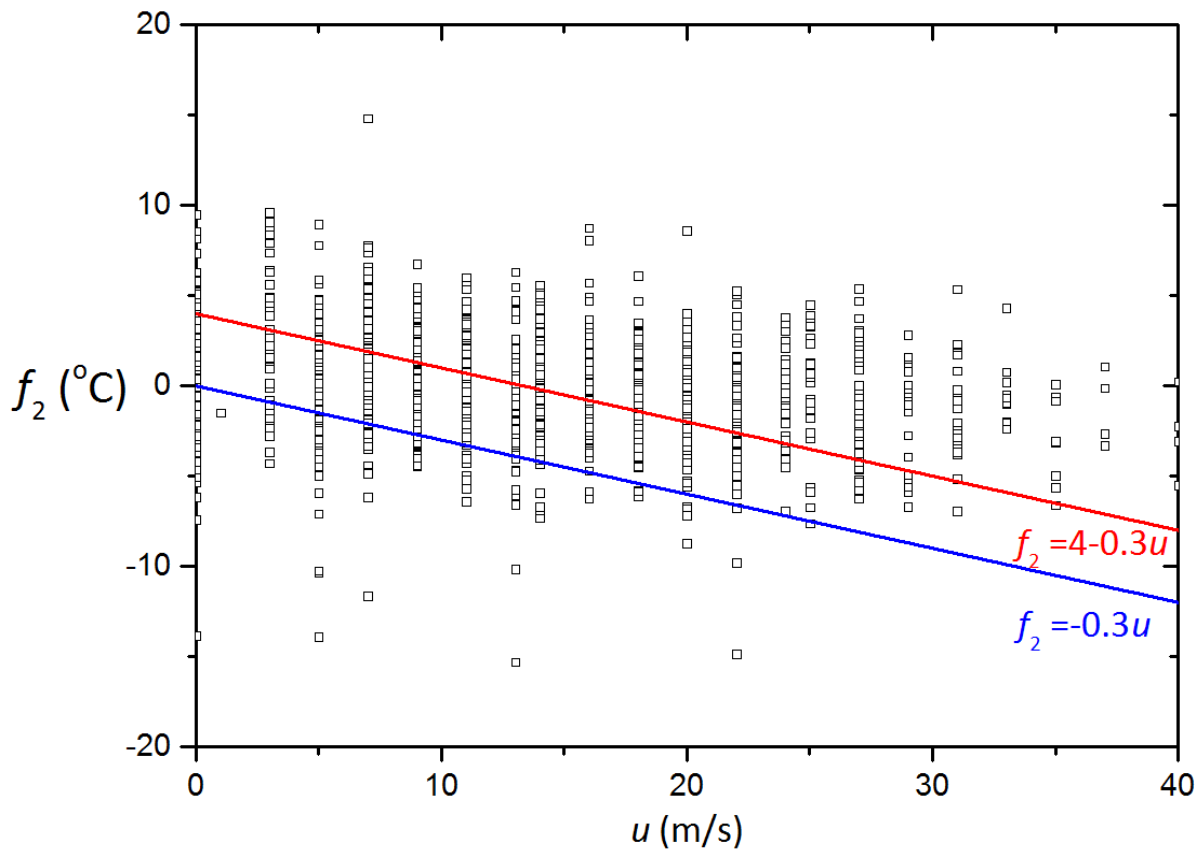


Figura 5-25: Variación de la función auxiliar f_2 con la intensidad del viento. De las líneas de mejor ajuste resulta $c_1 = -0.3$.

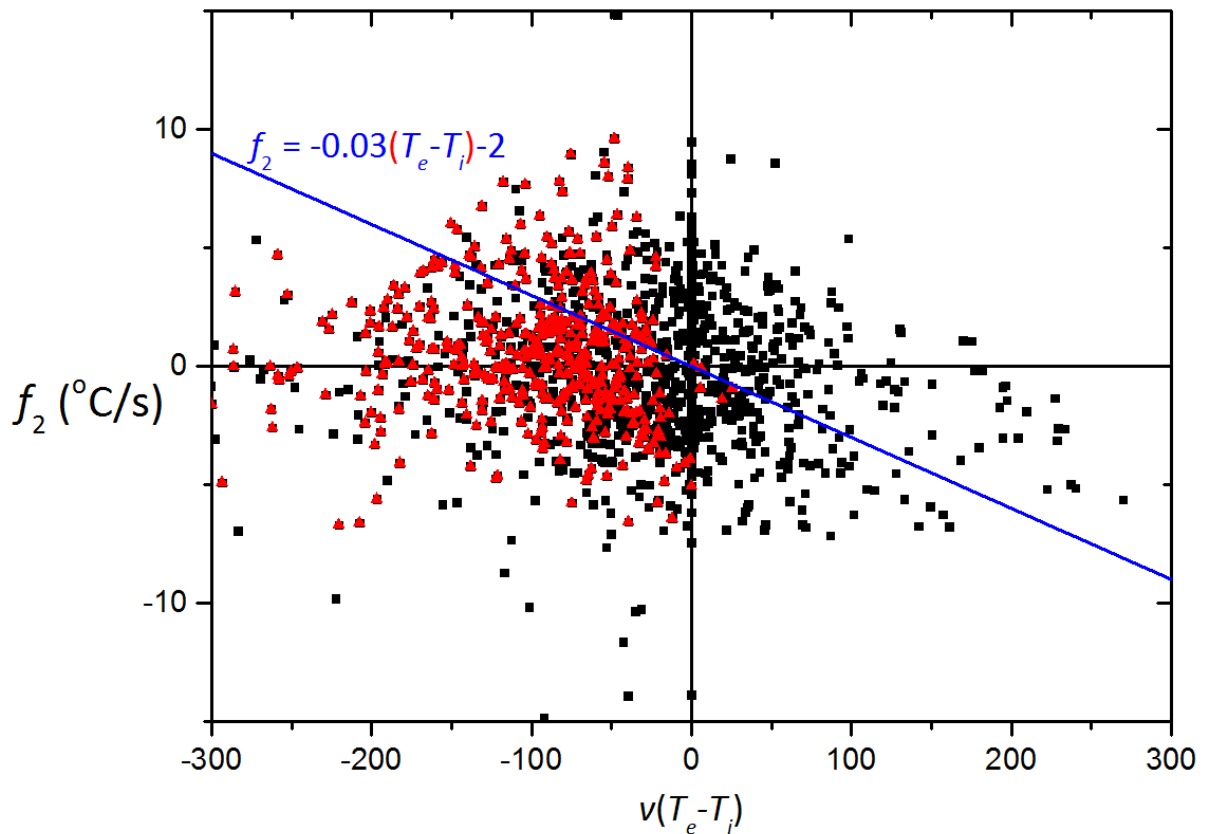


Figura 5-26: Variación de la función auxiliar f_2 con la intensidad del viento. De las líneas de mejor ajuste resulta $c_2 = -0.03$. Los símbolos corresponden a registros diurnos (■) y nocturnos (▲).

Hallados los coeficientes, se integra la Ec. (4-73) (sin bien con Ec. 4.72 se obtienen resultados similares) con la CI $T_i(t=0)$ = valor medido el primer día del periodo analizado. En la Figura 5-27 se aprecia que la estimación de $T_i(t)$ realizada de esta manera concuerda con las medidas tanto en PB como en PA, sin error acumulativo apreciable luego de 60 días. Por lo tanto, la Ec. (4.73) y los coeficientes hallados dan cuenta de las características térmicas medias del edificio analizado.

Las contribuciones de cada término de la Ec. (4.73) al intercambio total de calor con el exterior se muestran en la Tabla 5.ix. Se halla que el 52-54% se debe a la conducción, 23-26% a los efectos convectivos del viento, 13-18% a fuentes internas y sólo 5-8% a la radiación solar. Este último resultado llama la atención, habida cuenta que el período estudiado es el de la máxima radiación solar anual (verano) y por la gran proporción de superficies vidriadas en la envolvente del edificio, y estaría indicando alguna falla de la metodología empleada que será resuelta en §5.5.2.

Por otra parte, la desviación estándar es muy alta en todas las variables. Esto es razonable en vista del modelo simplificado empleado, el cálculo de una derivada y la distancia a las estaciones meteorológicas que proveen los parámetros externos. Un suavizado de las curvas disminuye la dispersión, pero se quiere mostrar aquí que ello no es necesario si el procesamiento para encontrar las rectas de mejor ajuste se realiza adecuadamente. Desde el punto de vista práctico, una gran dispersión implica que es necesario tener un número apreciable de datos para obtener valores

precisos de los coeficientes. Sin embargo, los datos deben abarcar un número grande de días; un mayor número de mediciones por hora en pocos días sólo agrega mayor dispersión.

Se buscó además una correlación entre dT_i/dt y otros parámetros medidos usualmente por las estaciones meteorológicas, en particular, con la nubosidad, la humedad relativa ambiente y la dirección del viento. Consistentemente, la nubosidad no tendría que influir debido al reducido

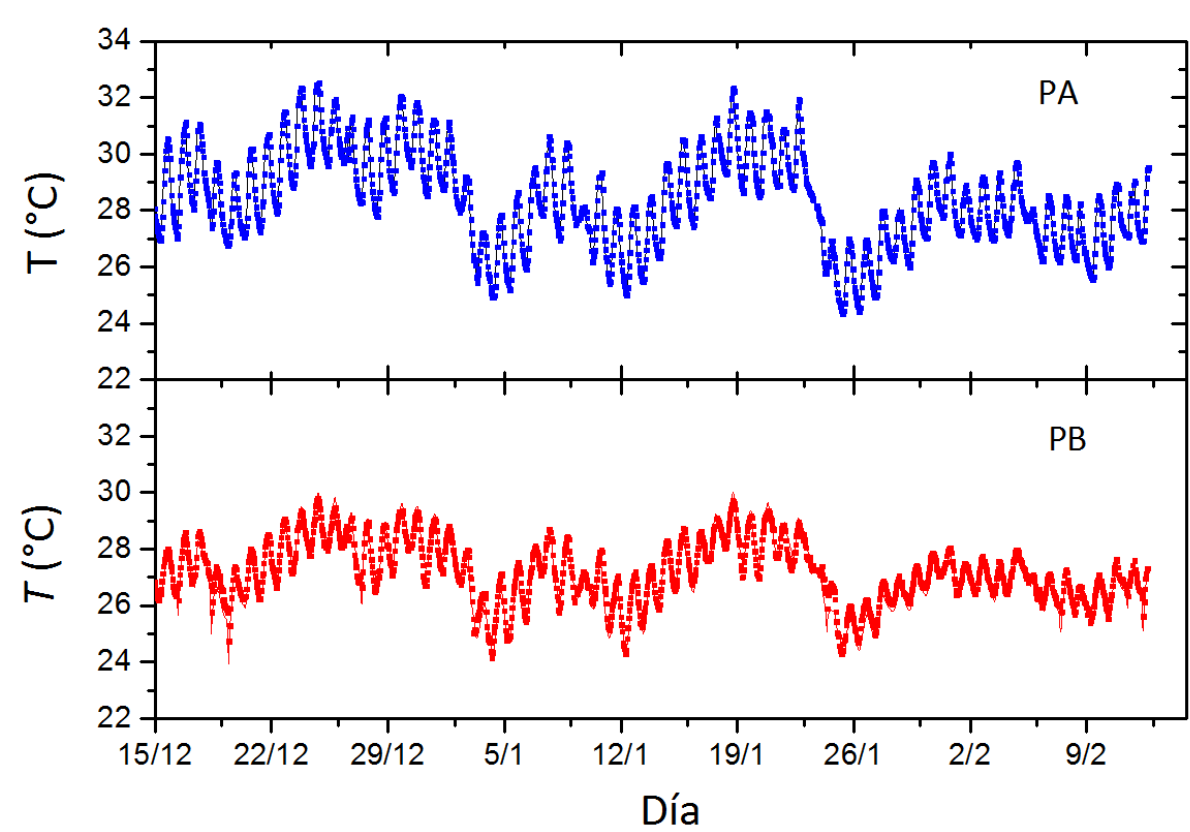


Figura 5-27: Comparación entre las temperaturas internas reales (símbolos) en ambas plantas del edificio y aquellas estimadas con la Ec. 4.73 (líneas).

	Contribución	Promedio	Desviación estándar	Suma	Mediana	Máximo	%
PA	Conducción	9.00	6.03	12818	8.51	26.31	54
	Radiación	0.75	0.91	1087	0.21	2.72	5
	Viento	3.79	3.82	5399	2.89	21.75	23
	Fuentes internas	3	0	4347	3	3	18
PB	Conducción	4.75	3.26	6762	4.35	14.62	52
	Radiación	0.75	0.91	1087	0.21	2.72	8
	Viento	2.39	2.08	2965	1.85	11.87	26
	Fuentes internas	1.2	0	1739	1.2	1.2	13

Tabla 5.ix: Estadística de los valores absolutos de cada término de la Ec. (4.78) en °C/s durante los 60 días analizados.

calentamiento debido a la radiación solar (Figura 5-24) con respecto a los otros procesos involucrados y analizados previamente. Sin embargo, se encontró que ninguna de las variables mencionadas parece afectar significativamente los resultados del MRLS. El análisis de otras correlaciones, quizás de menor importancia relativa, permite estudiar las consecuencias de otros procesos físicos. Por ejemplo, una correlación entre T_i y la diferencia de humedad entre el interior y exterior se relaciona con el cambio de contenido de vapor de agua por renovación del aire; por lo tanto, una escasa correlación entre estas variables sugeriría una escasa ventilación del edificio. Estas limitaciones del MRLS para detectar las dependencias con otras variables llevaron a plantear el MRLM (§4.5.1).

5.5.2 Modelo de Regresión Lineal Múltiple (MRLM)

En la Tabla 5.x se presentan los coeficientes de la Ec. (4.78), y sus respectivas desviaciones estándar, para ambas plantas del edificio, calculados con el MRLM. El coeficiente de determinación (*adjusted R^2*) del proceso de ajuste estadístico es de 0.62 tanto para planta baja como alta. Por su parte, los valores de a , b , c , d y f_{RLM} reflejan la importancia relativa de los procesos físicos sobre la variación de la temperatura interna. La contribución debida a la radiación solar surge como la más significativa, seguida por la conducción, la convección debida al viento y, finalmente, la diferencia de la humedad específica. Este ordenamiento de los procesos presentes, del mayor al de menor importancia, se denominará “orden 1” y ya fue establecido en la Ec. (4.78). Para poder comparar, se agregan a la Tabla 5.x los resultados del proceso secuencial presentado en §5.5.1 siguiendo ese mismo orden, además el “orden 2” establecido en esa Sección cuando se elige ΔT como primera variable.

Proceso	Coef	Variable	Planta	RLM	Método secuencial con orden 1	R^2	Método secuencial con orden 2	R^2
Radiación	a	I_r	Baja	0.566±0.017	0.587±0.012	0.618	0.313±0.014	0.252
			Alta	1.025±0.024	0.850±0.019	0.579	0.322±0.014	0.266
Conducción	b	$(T_e - T_i)$	Baja	0.106±0.067	0.026±0.014	0.002	0.470±0.019	0.306
			Alta	-0.138±0.099	-0.175±0.023	0.038	0.504±0.034	0.133
Convección	c	u	Baja	0.087±0.021	0.077±0.020	0.010	0.185±0.023	0.042
			Alta	0.238±0.032	0.199±0.031	0.028	0.186±0.023	0.043
Ventilación	d	$(H_e - H_i)$	Baja	-0.022±0.035	0.008±0.007	0.000	-0.093±0.008	0.091
			Alta	-0.062±0.053	0.027±0.012	0.003	-0.101±0.009	0.088
Generación interna	f_{RLM}	---	Baja	0.164±0.011	-0.173±0.023		-0.066±0.027	
			Alta	-0.431±0.018	-0.329±0.038		-0.047±0.035	

Tabla 5.x: Coeficientes de la Ec. (4.78) hallados con el modelo de regresión lineal múltiple y el de regresión lineal aplicada en forma secuencial con dos órdenes diferentes de las variables.

La Figura 5-28 ilustra el proceso secuencial presentado en §5.5.1 siguiendo el “orden 1”, mientras los respectivos coeficientes se presentan en la 6^{ta} columna de la Tabla 5.x. Se observa que los valores obtenidos secuencialmente son muy próximos a los hallados con el MRLM mostrados en la 5^{ta} columna, por lo que ambas metodologías de cálculo parecen aparentemente equivalentes. Sin embargo, si se cambia el orden de la secuencia de las regresiones lineales, cambian los valores de los coeficientes como se infiere al comparar los gráficos 5-28 con las Figuras 5-23 a 5-26 halladas con el “orden 2”. Los gráficos 5-28 y los presentados en §5.5.1 son similares; sin embargo, los coeficientes cambian en forma apreciable si se elige I_t ó ΔT como primera variable. También cambia significativamente el valor del coeficiente de determinación estadística R^2 que es un indicador de la correlación entre la variable dependiente respecto de la(s) independiente(s) en el rango 0–1 (no correlación y correlación perfecta, respectivamente).

La Figura 5-29 permite comparar gráficamente los coeficientes hallados en las diferentes formas. Se observa que los valores encontrados en forma secuencial con el orden 1 son similares a los obtenidos con el MRLM, mientras que con el “orden 2” se presentan mayores discrepancias. Otra

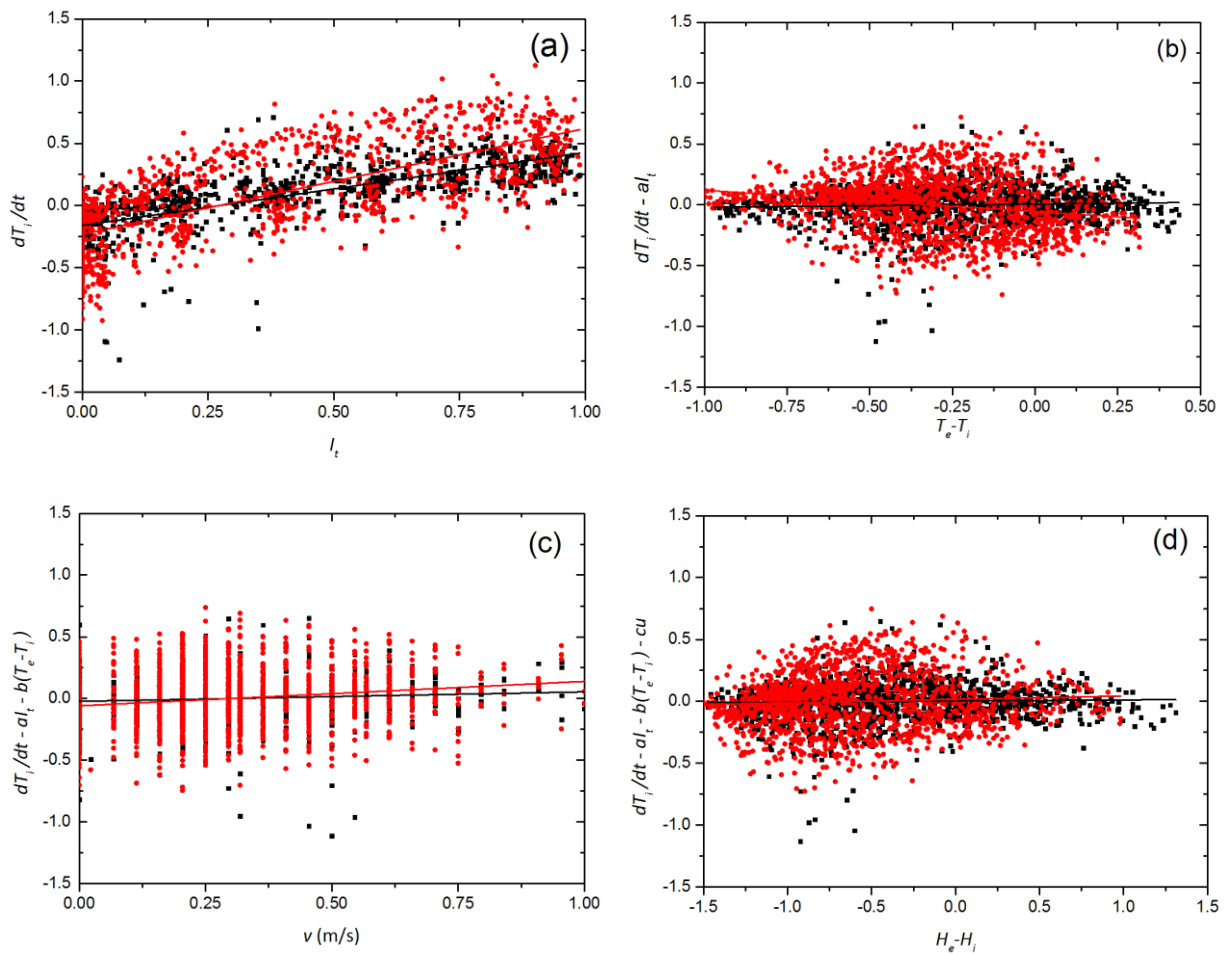


Figura 5-28: Correlación secuencial de la variación de la temperatura interior con: a) la radiación solar, b) la diferencia ΔT , c) la intensidad v , y d) la diferencia entre la humedad específica externa e interna. Se incluyen las rectas de mejor ajuste para los 60 días del verano de 2013–4 encontradas por el método de ajuste secuencial. Los símbolos corresponden a registros en PB (■) y PA (●).

forma de comparar las metodologías de ajuste es mediante el residuo $e_{cm,r}$ dado por las Ecs. (4.77) y (4.78), como ilustra la Figura 5-30. Puesto que los gráficos de la izquierda, correspondientes al ajuste con el MRLM, resultan muy similares a los de la derecha, correspondientes al ajuste en forma secuencial, la representación del residuo no parece adecuada para distinguir la confiabilidad del método.

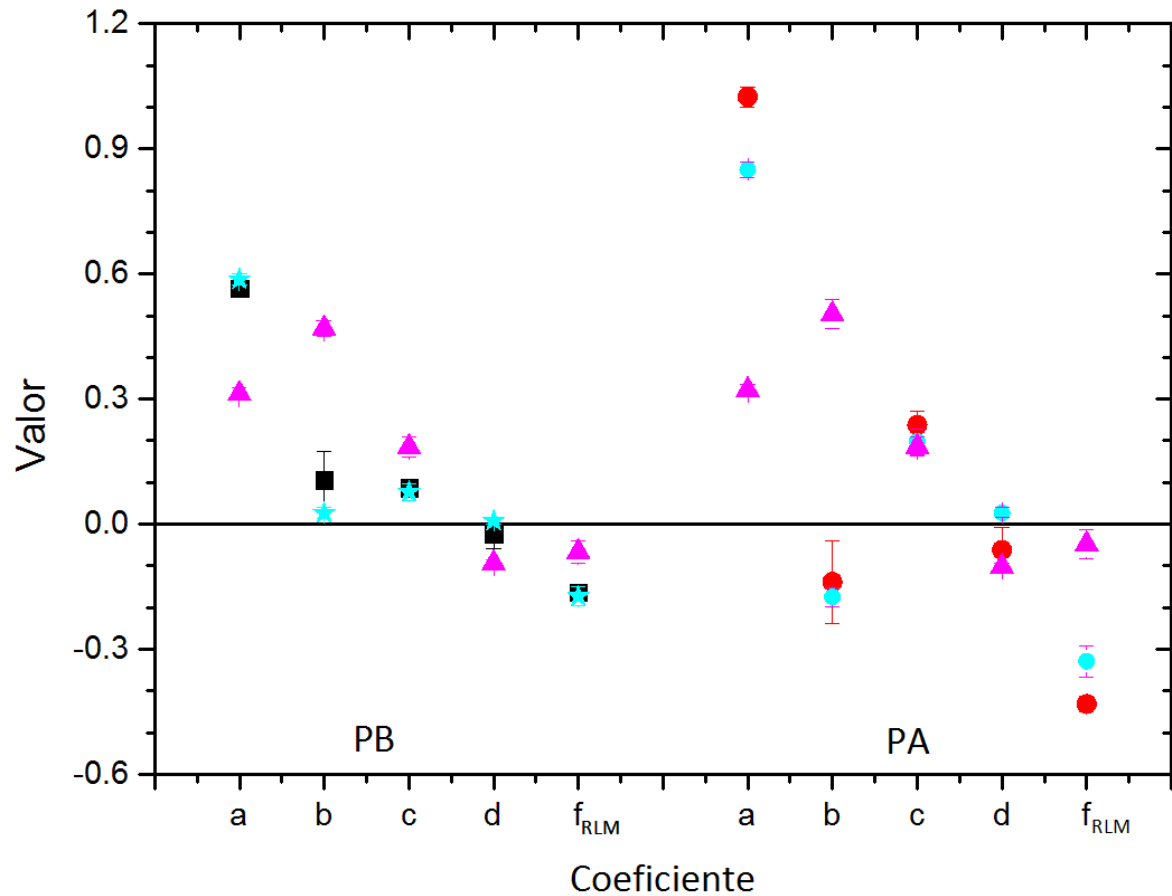


Figura 5-29: Coeficientes calculados con el MRLM (PB: ■ y PA: ●) y por el método secuencial con el "orden 1" (★) y "orden 2" (▲).

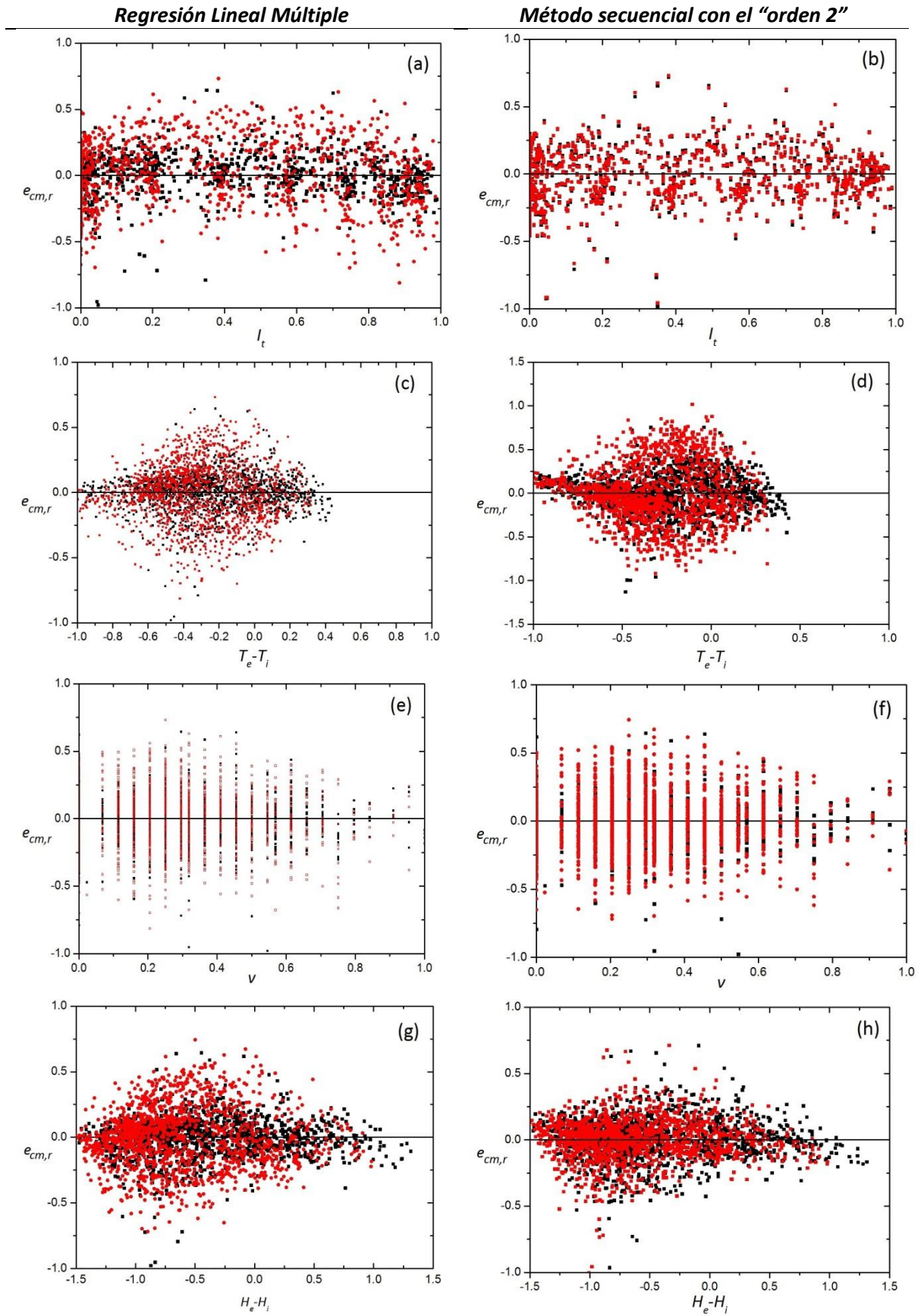


Figura 5-30: Residuos de los procesos de ajuste con MRLM (izquierda) y en forma secuencial (derecha) representados en función de: (a, b) la intensidad de la radiación, (c, d) la diferencia de temperatura entre el interior y exterior, (e, f) la velocidad del viento y, (g, h) la diferencia de humedad específica del aire.



6. SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO

6.1 Descripción general del programa *EnergyPlus*

La simulación del intercambio de energía con el exterior y los efectos de las principales cargas térmicas del edificio de la Biblioteca Central se realizó con la versión 8.6 del programa *EnergyPlus* (Crawley et al., 2001; <https://energyplus.net/>). Esta herramienta surgió a partir de los programas BLAST y DOE-2, creados entre 1960 y 1980 con el objetivo de realizar estudios de adaptación, optimización del rendimiento de energía y la evaluación de la potencia óptima de instalaciones de climatización. Es administrado por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) y su desarrollo es financiado por la Oficina de Tecnología de la Construcción (*Office Building Technologies* - BTO) del Departamento de Energía (DOE) de Estados Unidos.

EnergyPlus es un programa de código abierto que se descarga gratuitamente junto con el manual y programas auxiliares que permiten la creación y edición de dos archivos principales de texto para el ingreso de datos y salida de resultados. La descripción tridimensional del edificio a evaluar se realiza con otros programas entre los que destacan *DesingBuilder* (programa comercial, <https://www.openstudio.net/>, etc.) y *OpenStudio* (<https://www.designbuilder.co.uk/>). Estos brindan una interfase de usuario que facilita la especificación de la geometría y las características del edificio, permitiendo obtener el formato tridimensional del mismo. Luego, introduciendo las condiciones atmosféricas locales y los datos de localización, se ejecuta *EnergyPlus* para calcular el balance de calor en las respectivas zonas térmicas.

El edificio DE LA Biblioteca Central se describe mediante 621 superficies que conforman 19 zonas térmicas o espacios (oficinas, auditorios, salas de estudio, etc.) distribuidos en PB y PA. Una zona térmica es un “volumen” con características térmicas únicas que pueden llegar a afectar el comportamiento térmico global de la construcción. El atrio central se divide en dos zonas, una en PB y otra en PA. Dos de las cuatro estructuras cilíndricas de las esquinas contienen las escaleras y por tanto se encuentran comunicados con el interior mientras las otras dos, con depósitos y baños, están normalmente parcial o totalmente cerrados. Puesto que los contornos deben definirse mediante superficies planas, el contorno circular de cada cilindro se aproxima con 40 superficies planas. La Figura 6-1 muestra diagramas de la representación digital del edificio en los que las paredes se representan con gris oscuro y las puertas y ventanas vidriadas con gris claro. El color violeta indica las superficies con características especiales (e.g. la baranda de la terraza, el porche de la puerta principal y la lucarna vidriada elevada por encima del nivel de la terraza) que intervienen en la convección del aire que rodea el edificio y en la proyección de sombras.

La energía ingresada por unidad de tiempo a cada zona térmica es igual a la suma de las cargas

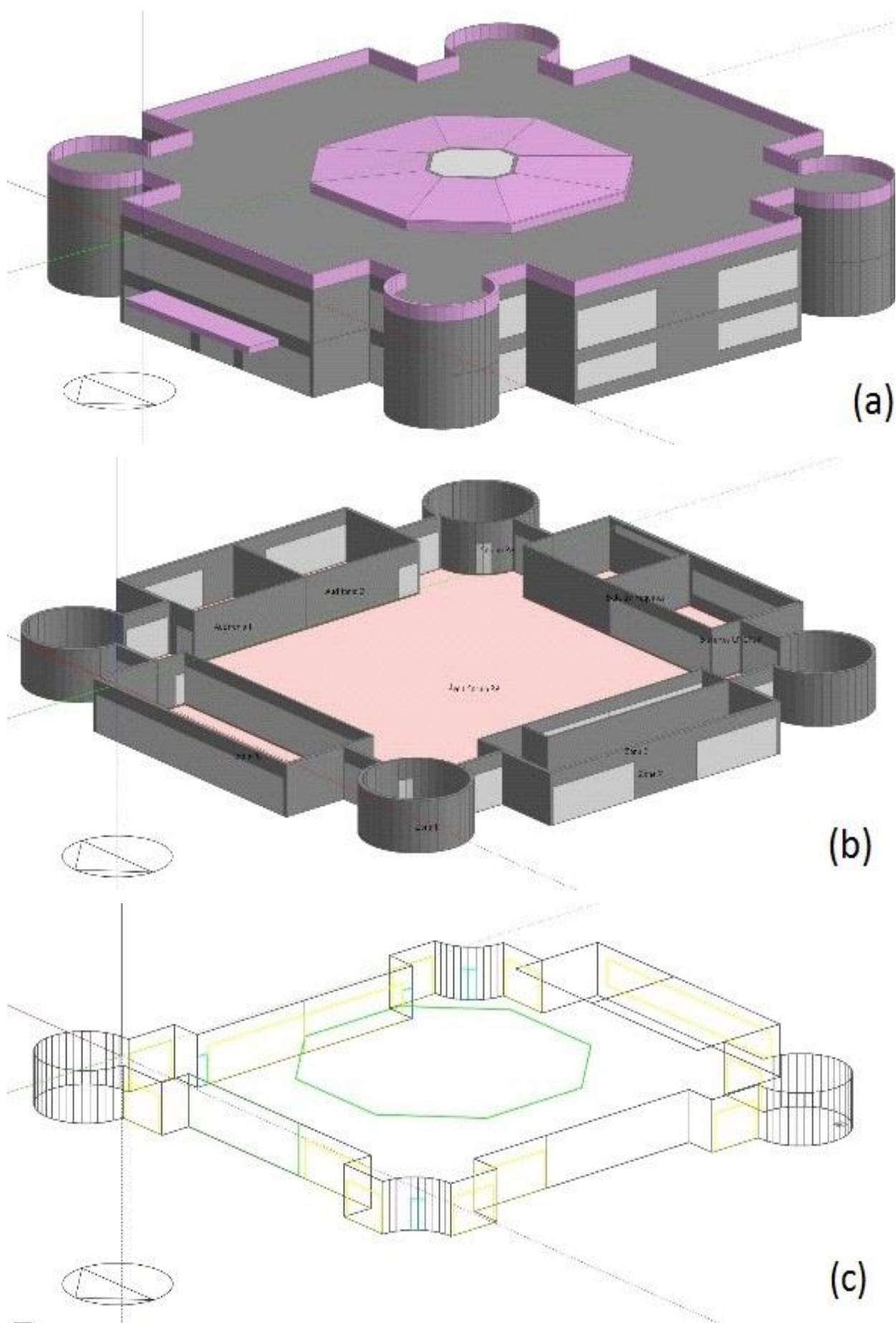


Figura 6-1: Geometría del edificio evaluado: (a) Envolvente, (b) Interior de la planta alta, (c) Interior de la planta baja.

internas, la transferencia de calor por convección y conducción desde las diferentes superficies, la transferencia de calor debido al aire ingresado desde zonas aledañas, el calor suministrado por la infiltración de aire desde el exterior y la salida de los sistemas de calefacción/aire acondicionado. La fórmula usada es:

$$C_{\zeta} \frac{dT_{\zeta}}{dt} = \sum_{k=1}^{N_q} \dot{Q}_{ik} + \sum_{k=1}^{N_s} h_{ik} A_k (T_{sk} - T_{\zeta}) + \sum_{k=1}^{N_{\zeta}} \dot{m}_{ik} C_{pa} (T_{\zeta k} - T_{\zeta}) + \dot{m}_e C_{pa} (T_e - T_{\zeta}) + \dot{Q}_{sys} \quad (6.1)$$

donde C_{ζ} y T_{ζ} son la capacidad calorífica y la temperatura en la zona ζ ; \dot{Q}_k es el calor aportado por las N_q fuentes de calor internas en la zona ζ que incluye las ganancias internas de calor debidas a la radiación solar, los ocupantes, las luces, los equipos eléctricos y las eventuales fugas térmicas; h_i es el coeficiente de transferencia de calor interno; A_i es el área; T_{sk} es la temperatura de la superficie k de las N_s superficies que envuelven la zona ζ ; \dot{m}_e es el flujo de aire (con capacidad calorífica C_{pa}) proveniente del exterior a temperatura T_e ; y \dot{m}_{ik} es el flujo de aire proveniente de las N_{ζ} zonas adyacentes a temperatura $T_{\zeta k}$; y \dot{Q}_{sys} es el calor entregado por el sistema de calefacción por aire o aire acondicionado en esa zona.

Cada término de Ec. (6.1) se calcula por separado. Por ejemplo, el ingreso de aire de densidad ρ_a a través de una abertura desde el exterior debido al viento es:

$$\dot{m}_e = \rho_a C_w A_w F_w v \quad (6.2)$$

donde $0 < F_w < 1$ es la porción abierta de una abertura de área A_w , C_w es el coeficiente de descarga y v es la velocidad del viento. Los valores de F_w dependen del tiempo y se seleccionan con la programación de *Schedules* (ver más abajo). La temperatura T_{sk} calculada por el programa se obtiene a partir del balance de calor en el interior de cada muro, techo, piso o DVH. En el caso de los muros expuestos al exterior, el cálculo realizado usando *EnergyPlus* equivale a lo descrito en §4.2.1, §4.3.1 y §4.4.1. La transferencia de calor no estacionaria hacia el interior se calcula por medio de funciones que consideran la radiación solar de onda corta e IR y el intercambio convectivo en la capa límite de aire que rodea el muro. Los cálculos para el techo y piso también incluyen la transferencia de calor no estacionaria. En cuanto a las superficies vidriadas, el programa calcula T_{se} y T_{si} de cada vidrio considerando la transferencia de calor en el interior del DVH, la transmisión y reflexión de la radiación visible e IR en las superficies y la absorción de energía en el material mediante cuatro ecuaciones acopladas. Este cálculo es mucho más minucioso que el realizado en los capítulos anteriores.

El balance térmico en todas las zonas, muros, etc. se realiza iterativamente para alcanzar la solución que describa a todas las partes. Notar que deben especificarse las características de todas y

cada una de las partes de la envolvente, tabiques, DVH y aberturas interiores. Esto constituye un gran desafío cuando se evalúan edificios complejos como el de la Biblioteca Central. El procedimiento se facilita recurriendo a valores estándar ingresados por defecto; aun así, deben corroborarse todos los valores a fin de que los resultados de la simulación sean correctamente asignados.

En general, el valor óptimo operativo de T_i para cualquier edificio es 26°C en verano y 20°C en invierno (norma EN 13779). Esta temperatura se define como “el valor deseable promedio entre las temperaturas medias interna y radiante de todas las superficies internas”. En Argentina las temperaturas externas máxima $TDMN$ y mínima $TDMX$ para el diseño son especificadas por la norma IRAM 11603 de *Clasificación bio-ambiental de la República Argentina* (Tabla 3.i para Tandil). Como se menciona en capítulos previos, esta información se usa para estimar el consumo energético medio durante cada estación del año mediante planillas de cálculo simplificado. *EnergyPlus* también permite simular el balance térmico con los valores medios de los parámetros listados en Tabla 3.i. Sin embargo, en este trabajo las simulaciones se usan para realizar el balance térmico del edificio hora por hora incorporando los valores de los parámetros meteorológicos registrados por las estaciones cercanas, y prestando especial atención a los valores críticos obtenidos en verano e invierno.

Las cargas térmicas de verano son distintas a las de invierno y en ambas estaciones hay periodos en los que es posible evitarlas. Por ejemplo, durante los periodos vacacionales, el edificio permanece cerrado y la ventilación es mínima, el número de usuarios y la disipación energética generada por la actividad metabólica de los mismos pueden despreciarse, como así también la carga térmica generada por la iluminación y los equipos eléctricos y electrónicos. Por lo tanto, la simulación del comportamiento térmico de la Biblioteca Central durante vacaciones y recesos resulta más sencilla con una notoria disminución de las incertezas de los parámetros utilizados. En caso contrario, la simulación que contempla la operación de los sistemas de calefacción, circulación forzada y aire acondicionado requiere definir lo mejor posible las cargas internas, introducir los parámetros que se correspondan con los equipos disponibles y programar los horarios de funcionamiento correspondientes de acuerdo con la ocupación horaria en los diferentes días de la semana.

Introduciendo los parámetros correspondientes, las principales características de la simulación son las siguientes:

- El programa proporciona una solución integrada ya que la respuesta térmica del edificio se encuentra acoplada a los sistemas primarios y secundarios. Un sistema primario es el encargado de producir calor (calderas) o frío (equipo de aire acondicionado central) para ser suministrado a los sistemas terminales del sistema de climatización, mientras que un sistema secundario es aquel que aprovecha el fluido usado para calentar o refrigerar el aire.
- Muestras temporales: es posible definir intervalos de tiempo para la interacción entre el ambiente interior, las condiciones externas y los sistemas primario y secundario. Los datos de entrada deben ingresarse para el lapso de un año y entonces es posible realizar simulaciones

anuales o para los intervalos de tiempo requeridos combinando los efectos de calefacción, aire acondicionado, ganancias internas, ventilación cruzada y natural, entre otras opciones.

- Datos de entrada y salida: el programa recibe y entrega archivos en código estándar *ASCII*, que incluyen las condiciones, normas e informes detallados definidos por el usuario.
- Balance térmico: realiza un cálculo simultáneo de los efectos radiativos y convectivos en las superficies interiores y exteriores.
- Modelos de confort térmico: es posible establecerlos con base en la actividad que se desarrolla en el edificio. También pueden ingresarse calendarios de uso.
- Es posible configurar diversos cambios sin necesidad de re-compilar el código fuente del programa.
- Es posible realizar cálculos de contaminación atmosférica.

6.2 Selección de los datos de entrada

EnergyPlus emplea múltiples opciones o comandos. Para el caso del edificio evaluado, los criterios y parámetros de simulación se fueron definiendo por medio de una secuencia de pruebas específicas a partir del año 2015 con la asistencia de técnicos integrantes del Instituto de Energías Renovables (UNAM, México). Funciona con los datos proporcionados por dos tipos de archivos principales: *.idf* y *.epw* relacionados con el diseño 3D del edificio y con los datos meteorológicos respectivamente. Como ya se mencionó, la disposición tridimensional del edificio y la generación inicial del archivo *.idf* se realizó con el programa *Design Builder* que contempla, además, la definición inicial de los materiales empleados en la construcción y sus propiedades térmicas. Es posible configurar el archivo de datos meteorológicos y otros datos de entrada, así como los archivos de salida, utilizando programas auxiliares. Los usados en nuestra investigación se presentan a continuación:

- **Programa auxiliar *Weather Statics and Conversions***

Emplea dos archivos de datos como entrada (Figura 6-2): un archivo *.csv* que contiene los datos meteorológicos adquiridos hora por hora en estaciones ubicadas en la zona, y un archivo de texto *.def* en el que se especifican las unidades, los factores de conversión, la localización geográfica del edificio, la altura sobre el nivel del mar, etc. La ejecución de este programa genera un archivo en el formato *.epw* preparado para ser leído por *EnergyPlus*. Con este programa auxiliar se pueden agregar, cambiar o quitar las variables meteorológicas consideradas en las simulaciones. Se usan los datos meteorológicos (T_e y HR del aire, presión, intensidad y dirección del viento) registrados por la estación del SMN comprendidos entre el 20/2/2016 y el 19/2/2017, y los datos de radiación solar provistos por la estación del IHLLA (§3.2.1). La radiación normal directa y la radiación normal difusa

se calculan a partir de la radiación global horizontal medida con el método de Liu-Jordan (§4.3.2) con un factor de ajuste de 0.85.

```

datos.def: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
&location
City='Tandil'
StateProv='Buenos Aires'
Country='ARG'
InLat=-37.2
InLong=-59.1
InTime=-3
InElev=188
/

&wthdata
InputFileType='CUSTOM'
InFormat='DELIMITED'
DelimiterChar=', '
NumInHour=1
DataElements=Date,HH:MM,direct_normal_radiation,global_horizontal_radiation,diffuse_horizontal_radiation,
dry_bulb_temperature,relative_humidity,wind_speed,wind_direction,atmospheric_pressure
DataUnits='dd/mm/yyyy','hh:mm','wh/m2','wh/m2','wh/m2','C','%','m/s','deg','Pa'
DataConversionFactors=1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1
/

&miscdata
/

&datacontrol
MissingDataAction=DEFAULT
MissingOpaqueSkyCoverAction=DEFAULT
MaxDirectSolar=1300
/

```

Figura 6-2. Archivo de texto .def usado en el programa *Weather Statics and Conversions*.

● Programa auxiliar *EP-Launch*

Este se compone de múltiples opciones o comandos configurados según las necesidades del usuario. Permite modificar fácilmente los archivos generados con *Design Builder* sin modificar el diseño del edificio como, por ejemplo, cambiar las características térmicas de la envolvente y seleccionar los resultados deseados en los archivos de salida. Los archivos .epw e .idf se ingresan seleccionando la opción *Browse*; la opción *Edit-IDF Editor* permite modificar el archivo .idf directamente mientras la opción *Edit Text Editor* modifica el archivo .def. Las variables de salida de la simulación se encuentran en el documento de apoyo *InputOutputReference*. Las principales configuraciones adoptadas fueron:

Simulation Parameters:

La información meteorológica local se especifica mediante la opción *SimulationControl*. Seleccionando la pestaña *Building* se configura la ubicación del edificio en una zona suburbana, su orientación, la falta de sombreado exterior (árboles, edificios aledaños) que lo expone a la radiación solar, la absorción total de la radiación que ingresa al interior, y la definición de 30 días destinados a la puesta en marcha del balance térmico global inicial (*WarmUp*). El número de pasos temporales (entre 4 y 30) entre datos meteorológicos consecutivos (horarios en nuestro caso) se especifica mediante la opción *TimeStep*. Se utilizan 6 pasos temporales para resolver el balance de calor y los cálculos de carga térmica ya que la temperatura no presenta variaciones bruscas por lo que un número mayor haría innecesariamente más lenta la simulación.

Location and Climate:

La latitud, la longitud, la elevación snm y la zona horaria de la ciudad se especifican seleccionando la pestaña *SiteLocation*. El periodo del año simulado se define mediante la pestaña *RunPeriod*, mientras que los días de interés se introducen usando el archivo de datos meteorológicos de Tandil seleccionando la opción *UseWeatherFile* en *Day of Week for Star Day*. Simulaciones específicas para días feriados, lluviosos y con nevadas, entre otros, son opcionales y deben definirse en el archivo de entrada *.def*.

Surface Construction Elements – Thermal Zones and Surface:

Esta opción también permite definir los materiales de construcción y sus propiedades térmicas introducidos inicialmente con *Design Builder*. Aquí se describen las características de los materiales opacos, los vidrios, la geometría que define las zonas térmicas y los materiales no másicos como divisiones internas y el sombreado.

Schedules (calendario):

Permite definir la frecuencia con la que actúan ciertos parámetros de la simulación y que están relacionados con el uso del edificio (e.g. nivel de ocupación en función del tiempo, encendido y apagado de luces en horarios específicos, encendido y apagado de equipos HVCA, ventilación natural en función del tiempo, días feriados, días con condiciones meteorológicas extremas, etc.). Esta información se configura en forma de bloques o compacta. Si se realiza por bloques, se ingresa sucesivamente la programación mensual, semanal, la diaria y por último la programación horaria del evento. La configuración compacta puede ser de tipo fraccional utilizando un valor de 0 a 1 para reducir la amplitud de la variable asociada. De esta forma puede programarse la calefacción con una potencia disponible del 50% (0.5). Si la configuración es de tipo control, se establece T_i como parámetro y el programa regula la potencia del calefactor / aire acondicionado para mantener estable dicha temperatura.

Advance Construction, Surface, Zone Concepts:

Esta opción permite configurar los coeficientes de convección interna (h_i) o externa (h_e) para cada superficie de interés. Es posible fijarles valores constantes o variable programando uno o varios *schedules*. Para el trabajo presentado en esta tesis se usaron los coeficientes determinados por la norma IRAM.

Internal Gains:

Aquí se especifican las cargas térmicas de todas las ganancias internas incluyendo las personas, las luces, los equipos eléctricos y de gas, y las zonas que contienen fuentes de contaminación del aire. Para cada una se debe definir un *schedule*.

Zone Airflow:

Permite definir las características de los flujos de aire dentro del edificio por zonas térmicas como, por ejemplo, la infiltración, ventilación natural, chimeneas, torres de enfriamiento, etc. En

este trabajo se utiliza para configurar la ventilación natural.

Output Reporting:

Permite elegir las salidas deseadas de los resultados que puede entregar *EnergyPlus* ordenadas por superficie, geometría, *schedules*, reportes resumidos, tablas anuales, mensuales, semanales y diarias y el reporte de variables dentro del cual se encuentran la temperatura, humedad y ganancias de calor internas. También pueden hacerse reportes detallados del flujo de calor y de la radiación solar o IR que ingresa o egresa a través de las superficies.

6.3 Resultados

6.3.1 Temperatura interna

Inicialmente se simula el balance térmico sin considerar las cargas térmicas interiores. Esto corresponde a un edificio “con poca ocupación y sin cargas térmicas significativas”. Se obtiene que, en el atrio central, T_i en PA resulta 0.66°C mayor que en PB mientras que la diferencia entre las T_i medidas con los sensores HOBOS es de alrededor de 0.895°C. Dada la escasa diferencia entre las T_i de PB y PA, y para visualizar mejor los resultados, en la Figura 6-3 se representa la temperatura promedio para el año analizado (20/2/2016 a 19/2/2017). La línea verde corresponde al promedio de T_i en el atrio proporcionada por el programa. Se observa que esta temperatura coincide aproximadamente con la medida (línea roja) en verano mientras que en invierno T_i simulada tiende a seguir el valor medio de T_e (línea negra). T_i medida (línea roja) se mantiene aproximadamente constante entre 22-23°C en invierno debido a que la calefacción, al contrario de lo que ocurre con la simulación, está encendida.

♣ Comportamiento térmico en verano

Durante el mes de enero, el edificio de la Biblioteca Central permanece cerrado o con muy poca ocupación y sin cargas térmicas significativas. En la Figura 6-4 se muestra una ampliación de la Figura 6-3 correspondiente a este mes, donde se aprecia el acuerdo razonable de T_i simulada con T_i medida. También concuerdan los tiempos para los que se obtienen los valores máximos y mínimos diarios de T_i , y también los tramos de las curvas correspondientes al enfriamiento nocturno. Las mayores diferencias se observan durante las bruscas variaciones de T_e acontecidas el 6 y 26 de enero. Notar que T_i resulta siempre próxima a 29°C con máximos de 31°C, revelando el sobrecalentamiento del interior durante el estío.

♣ Comportamiento térmico en invierno

En la Figura 6-5 se muestra una ampliación de la Fig. 6-3 correspondiente al periodo de tiempo coincidente con el receso universitario invernal comprendido entre el 16 y 31 de julio de

2016. T_i simulada sin calefacción (línea verde) se mantiene en los valores máximos de T_e en forma similar a lo que ocurre en verano (Figura 6-4). Para obtener valores simulados similares a los de T_i medidos (línea magenta), es necesario suministrar unos 450 kWh diarios de calefacción al atrio central. Esta cantidad de calor es sólo una parte del total que es necesario entregar al edificio completo (atrio, oficinas, auditorios, salas de estudio, etc.) para mantener la temperatura a un nivel de confort.

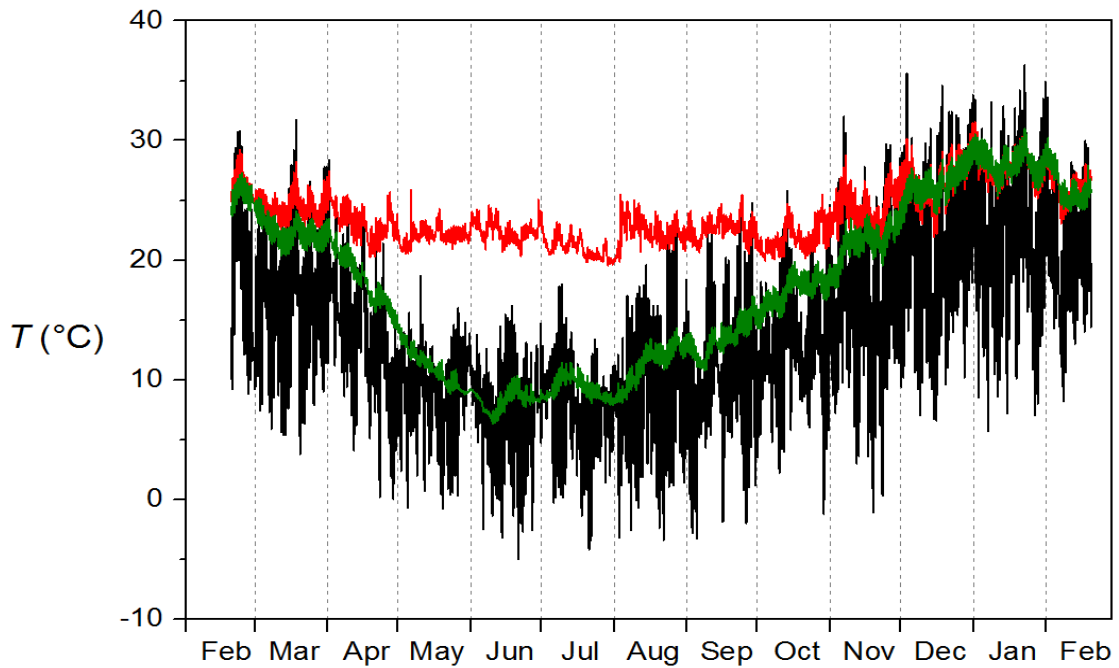


Figura 6-3: Evolución de la temperatura externa (línea negra), la temperatura interna promedio medida (línea roja), y la temperatura interna promedio (línea verde) que resulta de la simulación sin considerar calefacción ni cargas térmicas.

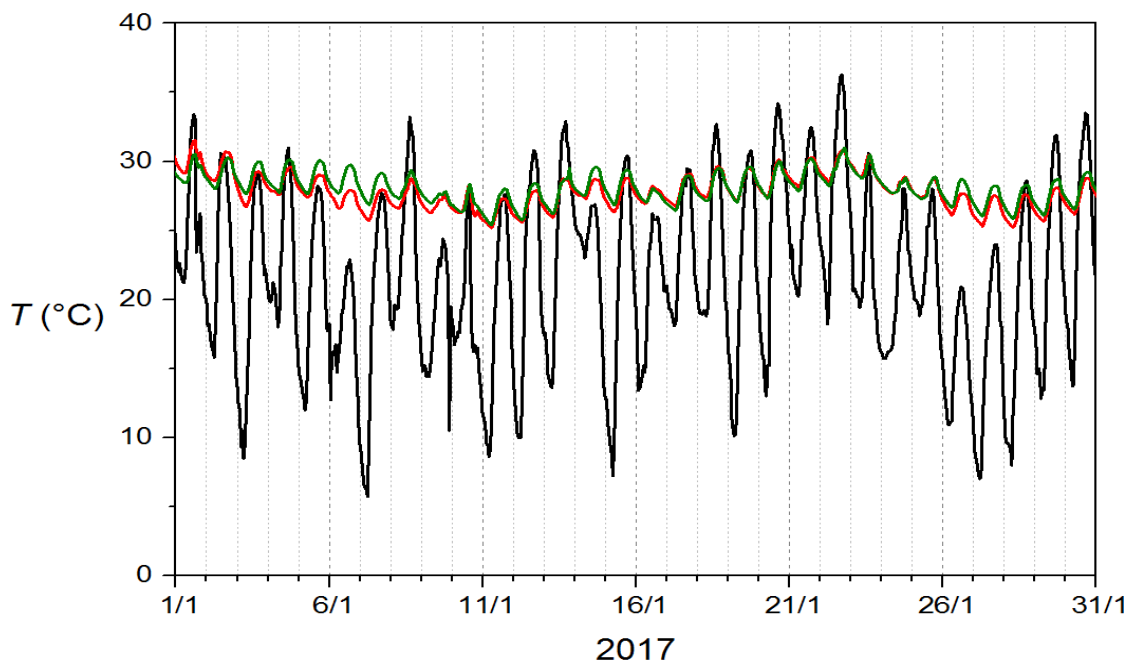


Figura 6-4. Ídem Fig. 6-3 para enero.

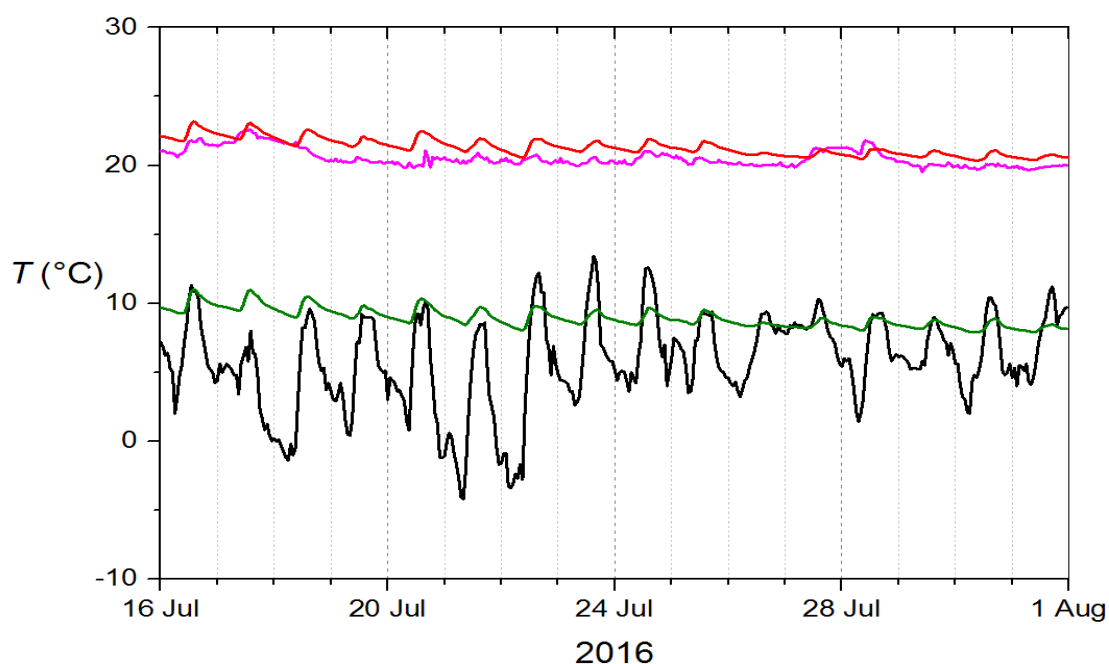


Figura 6-5: Evolución de la temperatura externa (línea negra), la temperatura interna promedio medida (línea roja), la temperatura interna promedio (línea verde) que resulta de la simulación sin considerar calefacción ni cargas térmicas, y temperatura interna que resulta de incluir la calefacción en la simulación (línea magenta).

6.3.2 Intercambio general de calor

En la Figura 6-6 se representa el calor intercambiado a través de la superficie exterior de la envolvente del edificio considerando las contribuciones de los procesos de conducción, radiación IR y convección a través de las diferentes componentes constructivas y excluyendo la cantidad debida a la radiación visible. Se simula la situación en la que el edificio se encuentra cerrado, los sistemas de aire acondicionado (verano) y calefacción (invierno) en el atrio permanecen apagados, y las fuentes adicionales de calor (iluminación, personas, equipos electrónicos, etc.) son desechadas. La Figura 6-6a muestra que la amplitud del intercambio de calor es significativa en verano debido a la importante ganancia solar durante el día y disipada por la noche. La contribución más importante a este intercambio es la debida a los muros (línea roja), seguida por la de los vidrios. En invierno (Figura 6-6b), la menor ganancia solar diurna, debida a la menor radiación solar, se compensa con calefacción generándose pérdidas igual de importantes durante la noche. Se observa que el intercambio de calor no es el mismo cada día, modificándose cuando la T_e cambia (Figuras 6-4 y 6-5).

6.3.3 Intercambio de calor a través de las superficies opacas

EnergyPlus provee detalles interesantes de los procesos de intercambio calórico a través de la envolvente de una edificación, como los que se exponen a continuación. La Figura 6-7 muestra el calor Q_c transmitido por conducción a través de los sectores constructivos de la envolvente compuestos por los muros verticales planos y cilíndricos y a través de las superficies horizontales

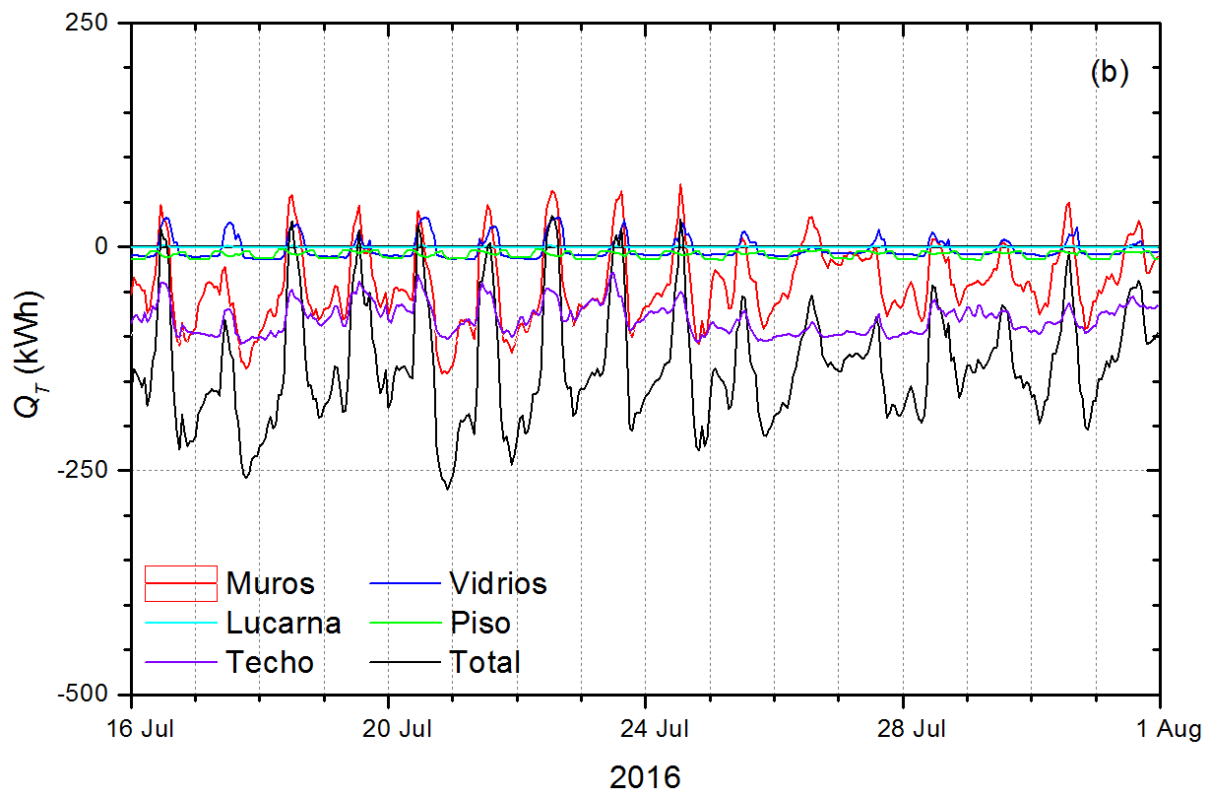
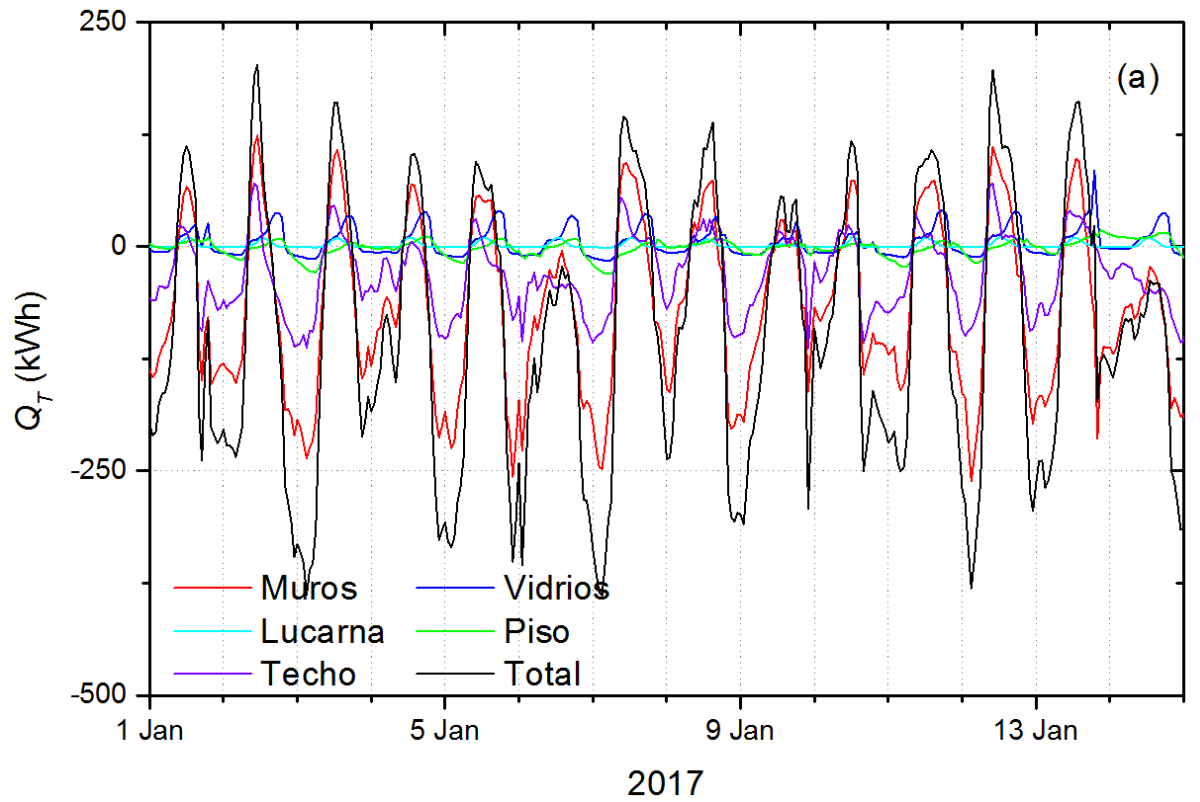


Figura 6-6: Intercambio total de calor a través de la superficie exterior (línea negra) de la envolvente determinado por las contribuciones del calor intercambiado a través de los muros (línea roja), del techo (línea violeta), del piso (línea verde), de los vidrios (línea azul) y de la lucarna (línea celeste) en verano (a) e invierno (b).

como piso y techo, durante los primeros días de enero del periodo evaluado. Las curvas de Q_c resultan ser similares durante el invierno y se omiten por brevedad. Valores positivos (negativos) de Q_c indican ganancias (pérdidas), es decir, representan a flujos de calor entrantes (salientes) del edificio. En la Figura 6-7a se observa que el calor ingresado a través de los muros orientados al NE (línea negra) es mayor por la mañana como era de esperar ya que ellos reciben la radiación solar directa matinal, mientras que a la tarde son los muros orientados al SO los que aportan mayor calor al interior pues reciben la radiación solar directa recién durante el ocaso. A través de los muros cilíndricos (Figura 6-7b) ingresa una cantidad de calor transmitido por conducción ligeramente menor que la transmitida del mismo modo a través de los muros planos. Por la noche, prácticamente todo el calor ingresado a través de los muros durante el día es devuelto al ambiente exterior. Debe recordarse que, por construcción, la lucarna se encuentra cerrada herméticamente.

La evolución del calor Q_c transmitido por conducción a través de las superficies horizontales se muestra en la Figura 6-8, donde se observa que el calor entrante y saliente a través del techo es similar al de todos los muros verticales juntos. Esto se debe a que el área total de los muros verticales que componen la envolvente es similar al área de techo. La asimetría observada entre el calor ingresado durante el día y el evacuado durante la noche a través del techo es similar a la encontrada en el caso de los muros, lo cual implica la presencia de un enfriamiento radiativo similar. Por otra parte, el intercambio de calor por conducción a través del piso es mucho menor y tiene una evolución diferente que el correspondiente al techo, ya que el piso no recibe aporte solar alguno. El calor intercambiado entre el edificio y el exterior a través del piso depende de la temperatura del piso del sector edificado cubierto y el suelo del parque que lo rodea, los cuales presentan un enfriamiento diferente al de los muros.

También es posible evaluar con *EnergyPlus* la transferencia del calor por convección a través de las superficies externas de la envolvente utilizando la fórmula $Q_{conv} = h_c(T_{se} - T_e)$ con $h_c = h_e$ (constante) proporcionado por norma IRAM (Tabla 2.i). La Figura 6-9 muestra los resultados obtenidos para los muros verticales planos y cilíndricos. Se observa que, en general, Q_{conv} es negativo, es decir, la convección disipa calor. No obstante, en algunos casos, al mediodía se distingue una transferencia de calor por convección hacia los muros.

El intercambio de calor Q_R por radiación térmica infrarroja entre las superficies externas verticales de la envolvente y su entorno se muestra en la Figura 6-10. Los muros orientados al SO y las superficies cilíndricas orientadas al O presentan el máximo de pérdida de calor al atardecer, como resultado del calentamiento solar producido durante ese tramo del día por la incidencia de la radiación solar directa. Los valores negativos (positivos) de Q_R indican que las paredes externas de la envolvente se encuentran a mayor temperatura que el ambiente externo y, como consecuencia, existe una persistente pérdida de calor por emisión de radiación IR.

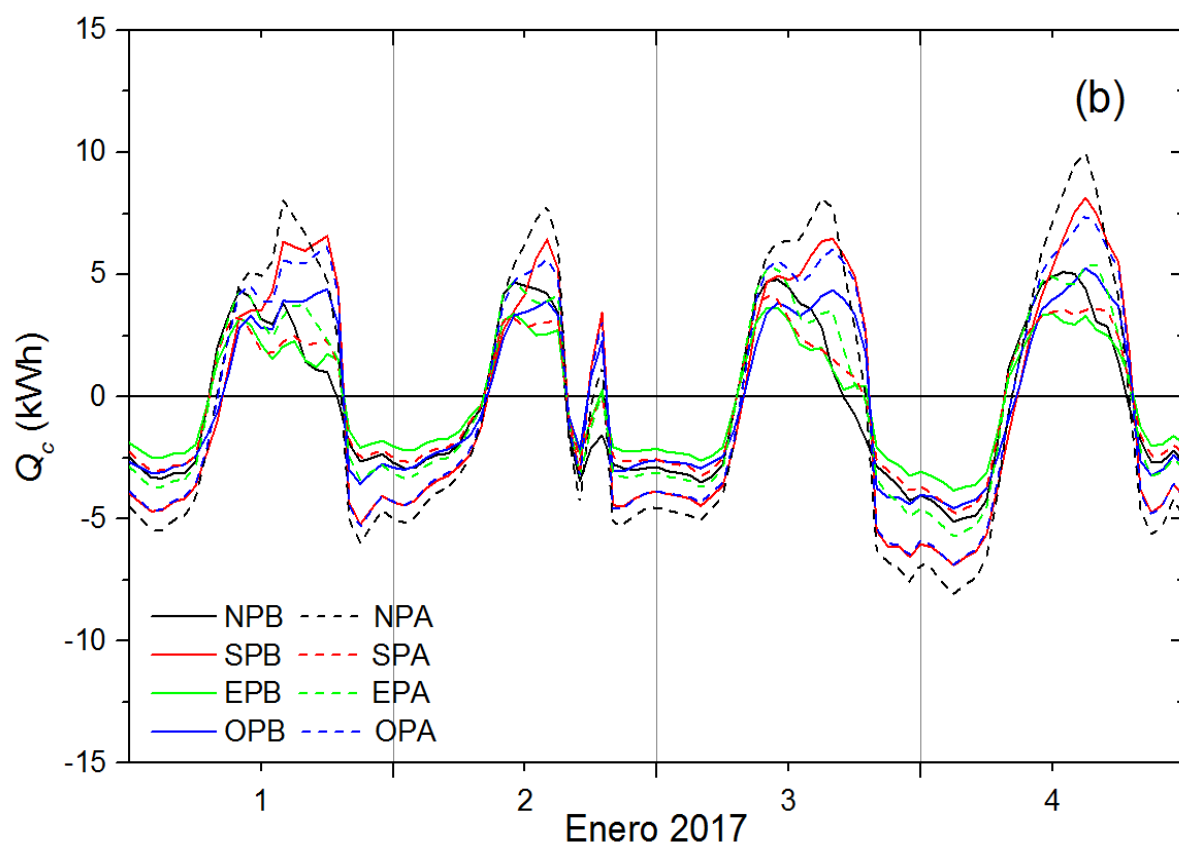
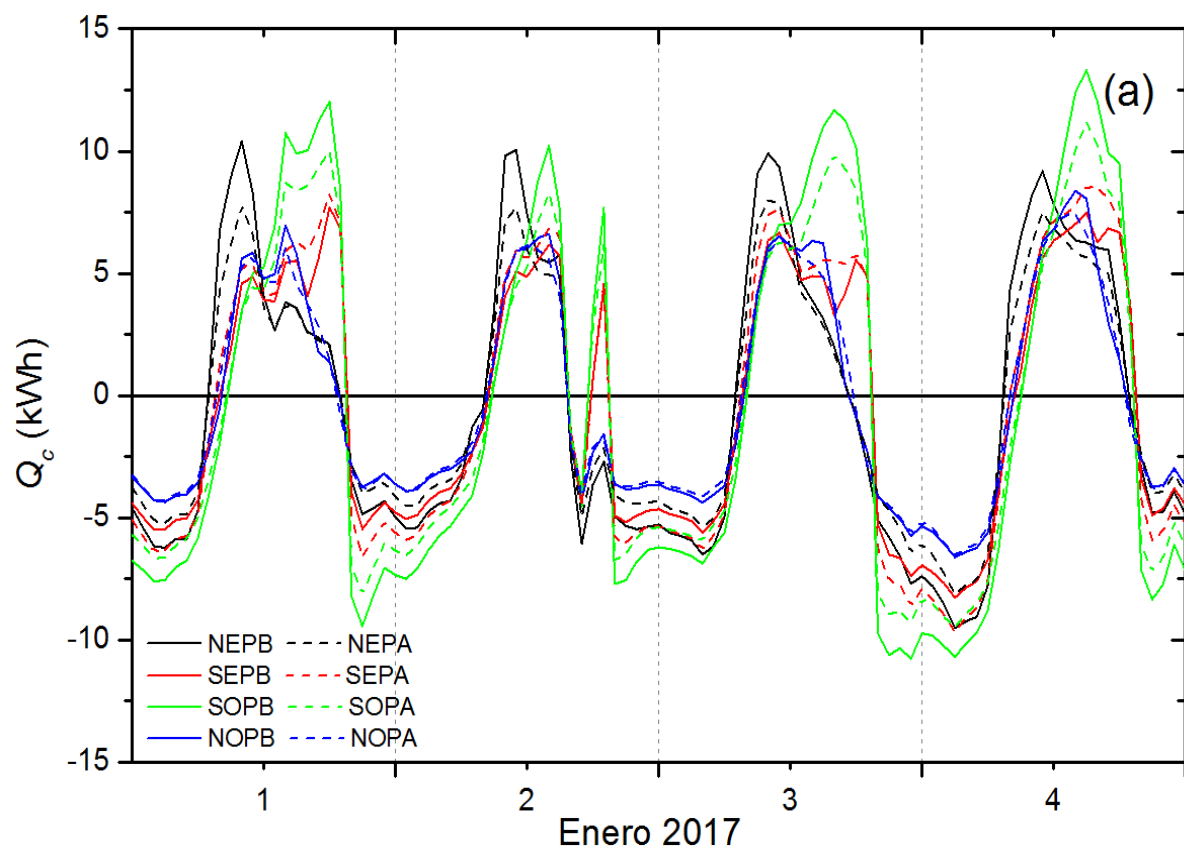


Figura 6-7: Evolución del calor total ingresado por conducción a través de la superficie externa de (a) los muros orientados al NE, NO, SE y SO, y (b) los cilindros orientados al N, O, E y S. Las líneas continuas corresponden a los flujos en la PB y las de trazos a los flujos en la PA. En ambos casos simulados, se establece que la lucarna permanece cerrada.

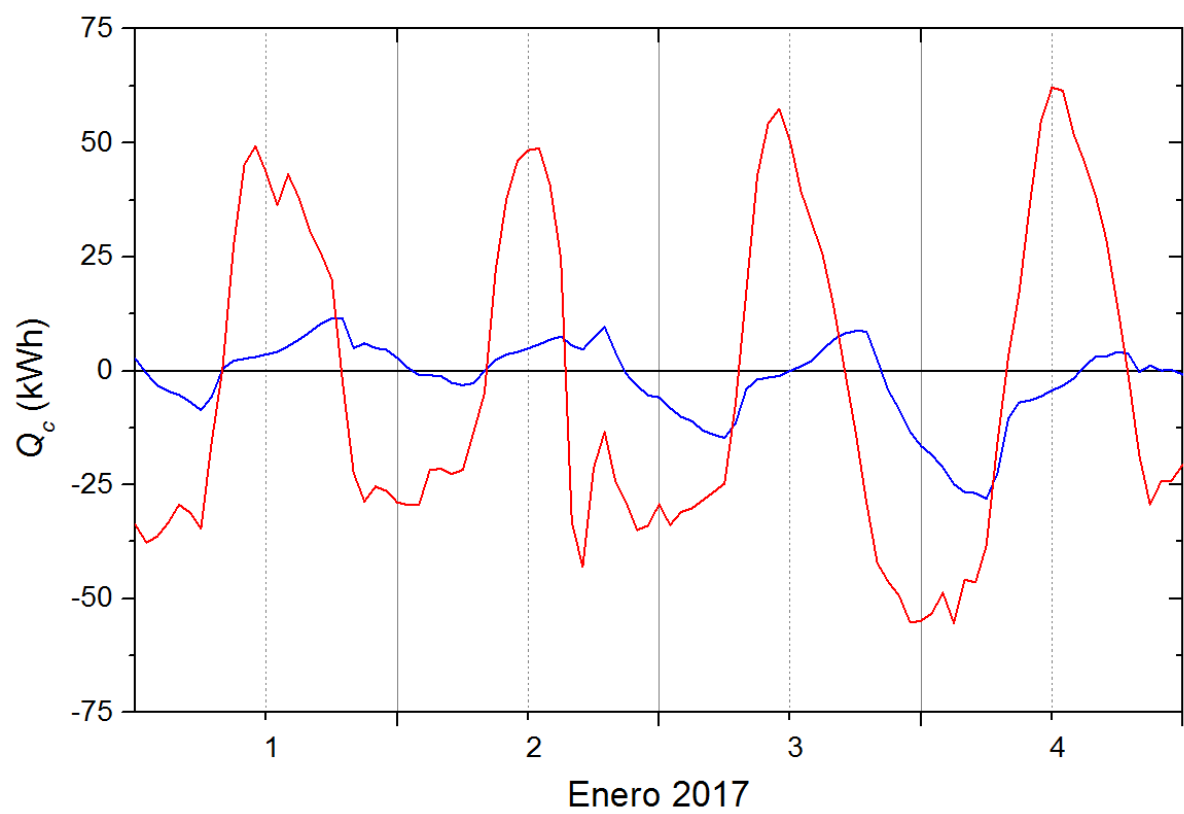


Figura 6-8: Evolución del calor total ingresado por conducción a través del piso (línea azul) y de la superficie superior del techo (línea roja).

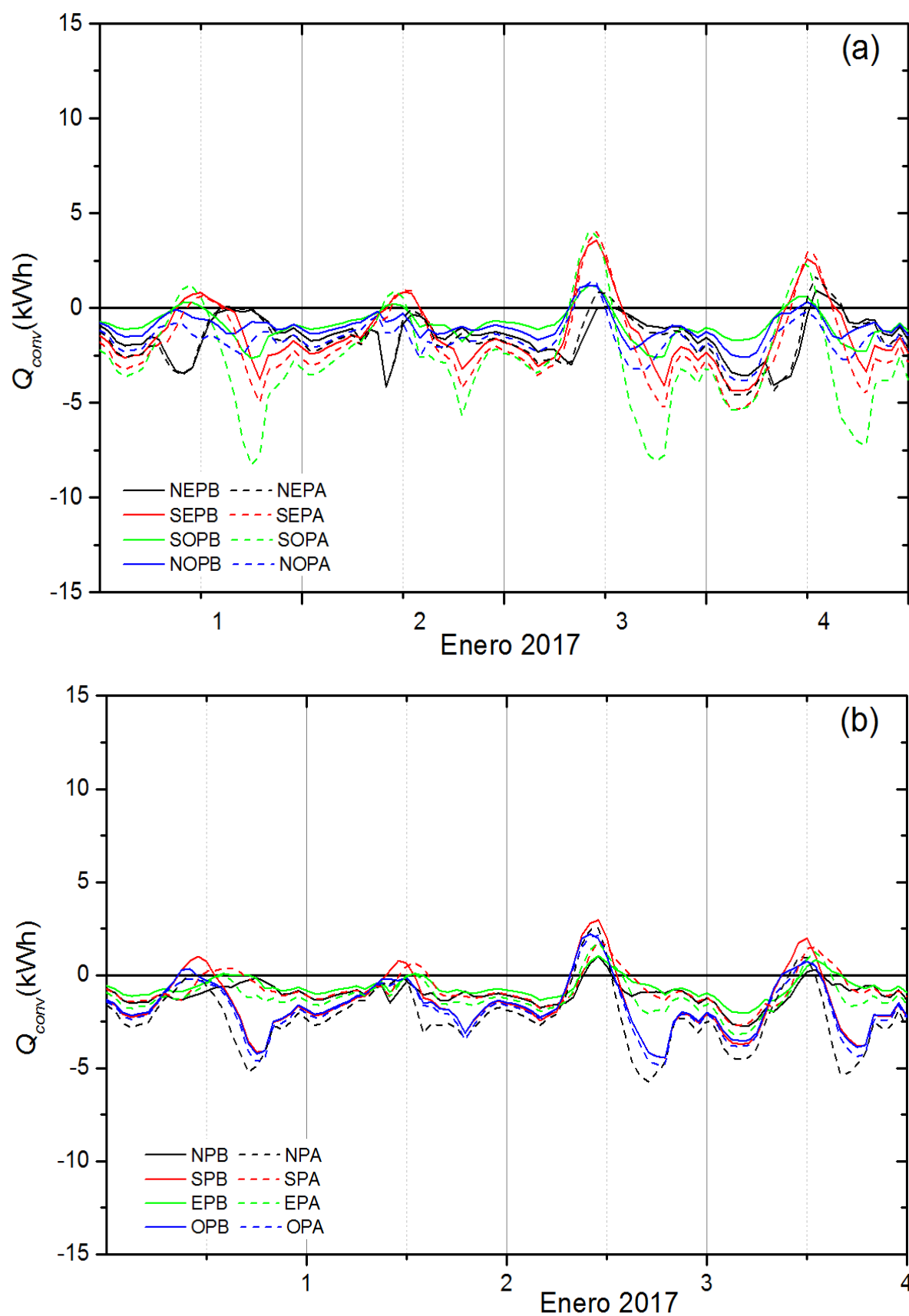


Figura 6-9: Evolución en los primeros días de enero de 2017 del calor total transmitido por convección a través de la superficie externa de (a) los muros orientados al NE, NO, SE y SO, y (b) los cilindros orientados al N, O, E y S. Las líneas continuas corresponden a los flujos en la PB y las de trazos a los flujos en la PA. En ambos casos simulados, se establece que la lucarna permanece cerrada.

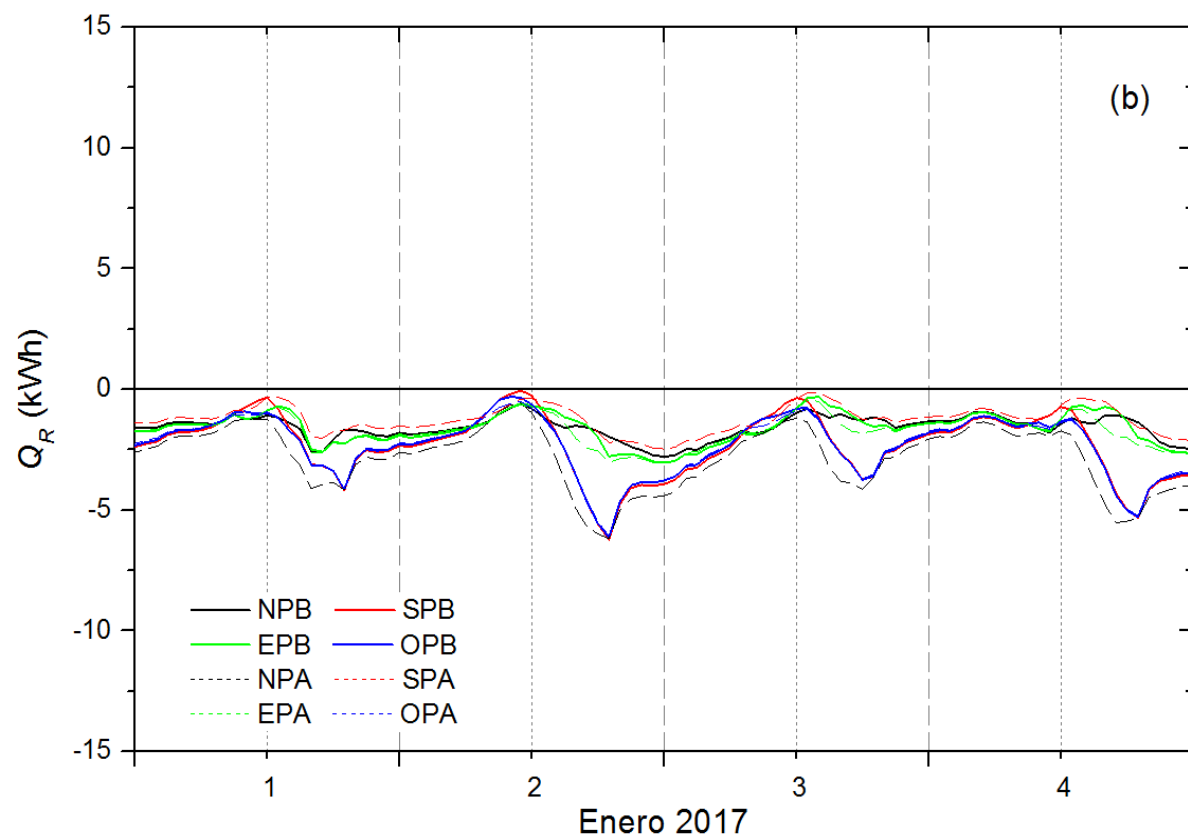
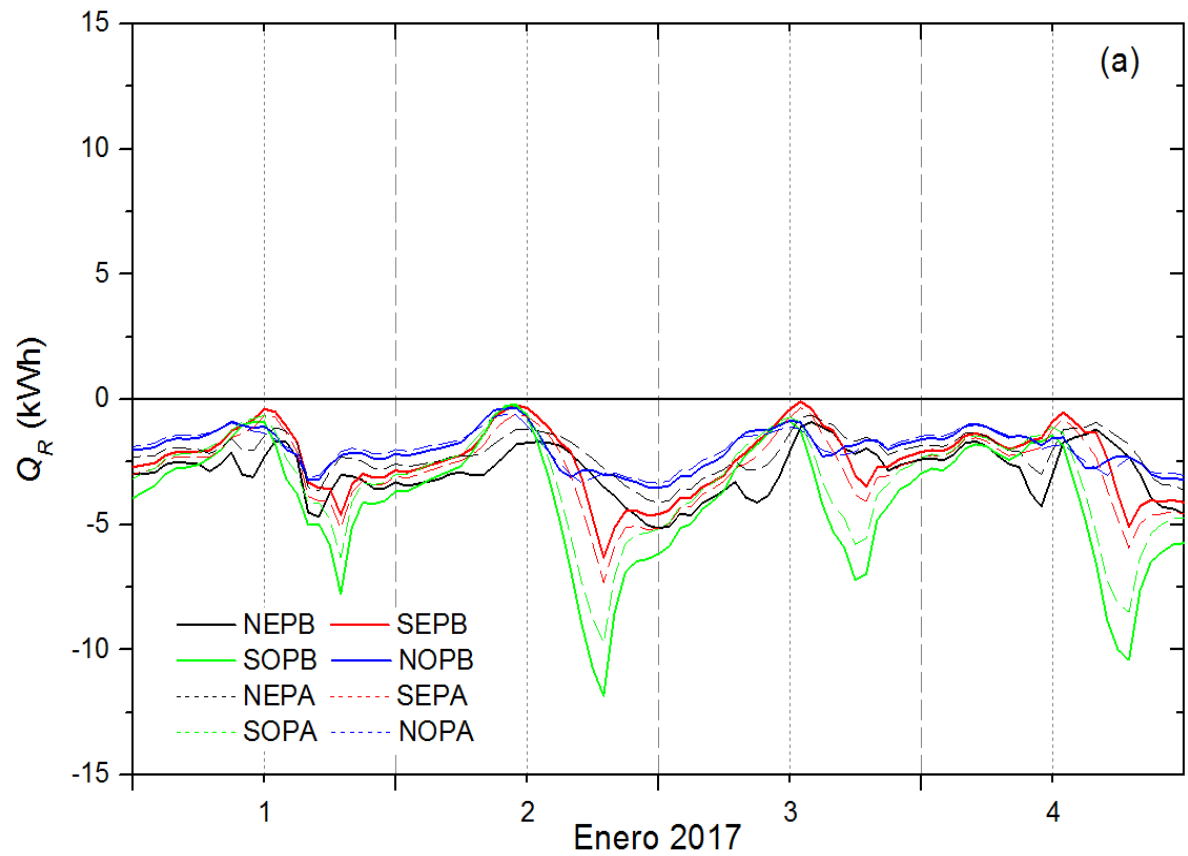


Figura 6-10: Evolución del calor total intercambiado por radiación a través de la superficie externa de (a) los muros orientados al NE, NO, SE y SO, y (b) los cilindros orientados al N, O, E y S. Las líneas continuas corresponden a los flujos en la PB y las de trazos a los flujos en la PA. En ambos casos simulados, se establece que la lucarna permanece cerrada.

El intercambio energético a través del techo requiere un análisis separado debido a su exposición a la radiación solar y a la emisión IR al cielo. La Figura 6-11 muestra que el calor ganado Q_{RS} debido a la radiación solar recibida en verano (Fig. 6-11a) es aproximadamente el doble que en invierno (Fig. 6-11b). Esta relación es similar a la que se infiere del comportamiento de I_{med} (Fig. 4-7). En verano, el calor absorbido durante las horas de luz solar es almacenado mayormente en el mismo techo y liberado como radiación IR durante todo el día con máximos a la tarde-noche como se observa en la Figura 6-12a. En invierno (Fig. 6-12b), el calor liberado como radiación IR es casi igual al liberado en verano y es mayor que el recibido como radiación solar incidente. Esto se debe a que en invierno la menor radiación solar se compensa con la pérdida de calor por conducción desde el interior del edificio.

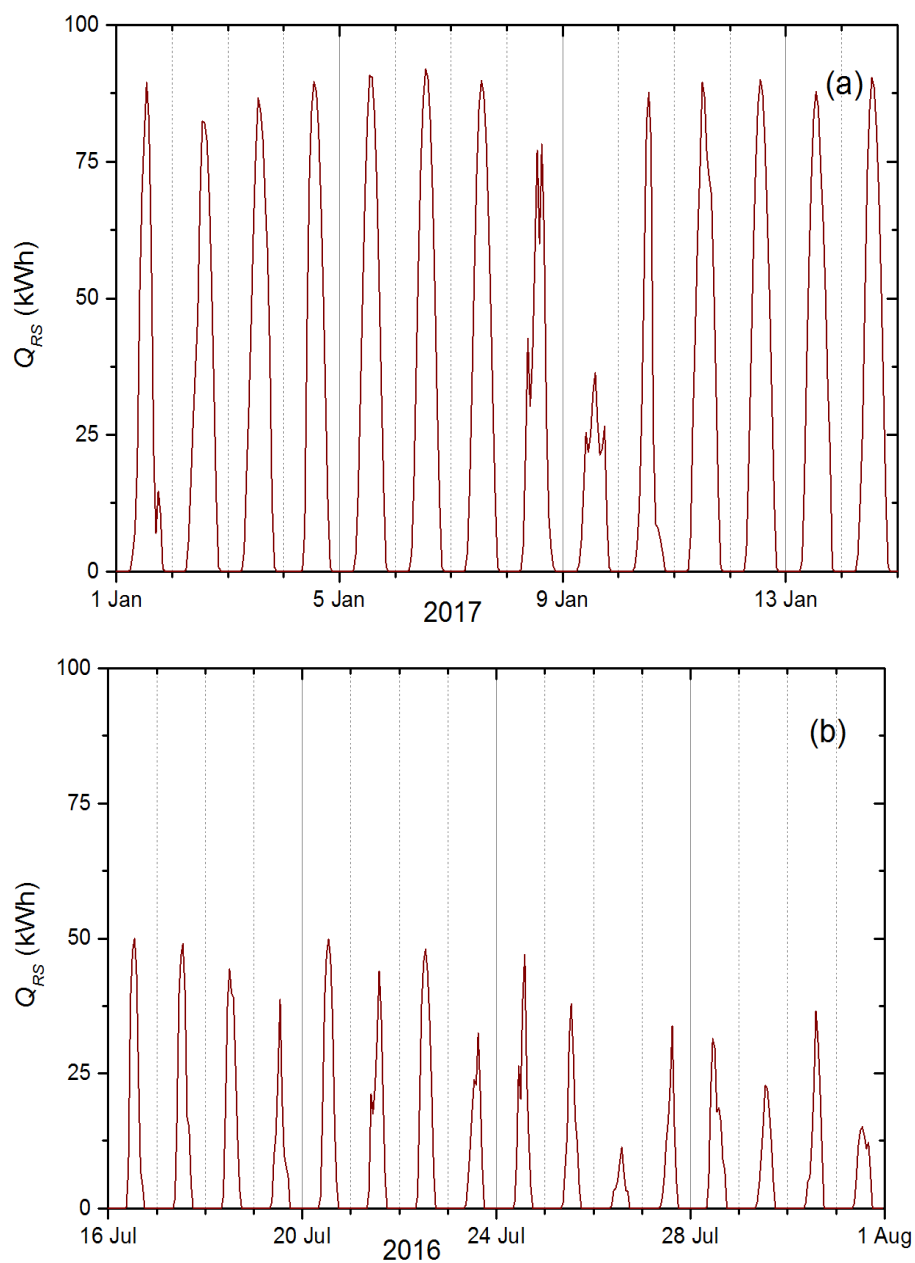


Figura 6-11: Ganancia de calor debida a la radiación solar incidente sobre el techo en verano (a) e invierno (b) calculada con EnergyPlus.

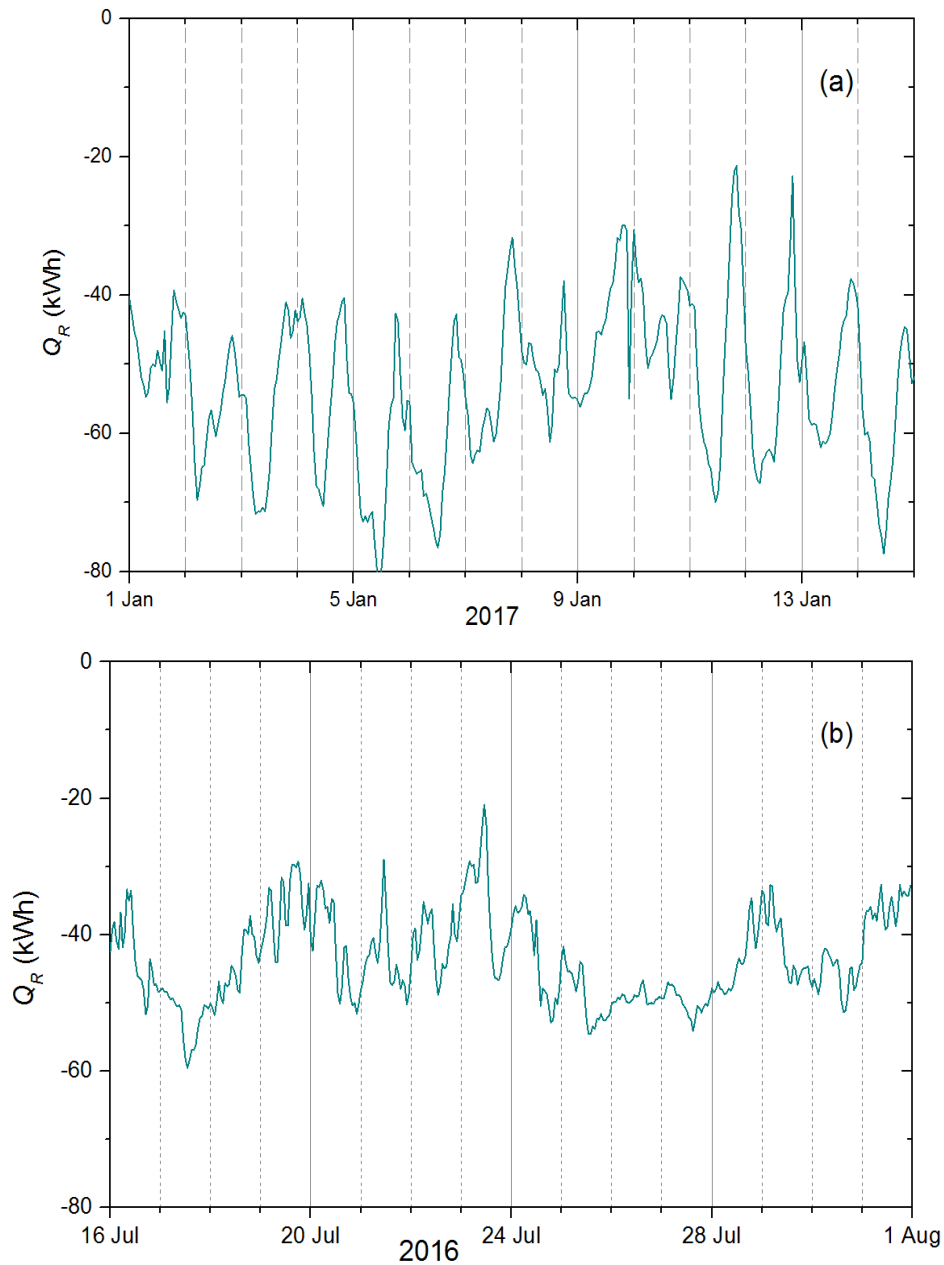


Figura 6-12: Pérdida de calor debida a la emisión IR del techo en verano (a) e invierno (b).

6.3.4 Intercambio de calor a través de las superficies vidriadas

En la Figura 6-13 se representa el flujo de calor entrante a través de las aberturas de vidrio. Este flujo Incluye las componentes asociadas con la radiación solar visible directa entrante, la radiación visible difusa que se pierde hacia el exterior, y el calor transmitido por conducción y convección a través de las superficies vidriadas y sus marcos. La máxima cantidad entrante por una superficie específica depende de la orientación, la protección que brindan los aleros del edificio y el área total de vidrio con cada orientación. En verano (Fig. 6-13a), a la mañana temprano, predomina el transporte de calor hacia el interior a través de las superficies orientadas al NE; al mediodía predomina el calor entrante por las superficies vidriadas orientadas al NO (frente del edificio), y hacia la tarde-noche predominan el flujo de calor a través de los paneles orientadas al SO (cuando la

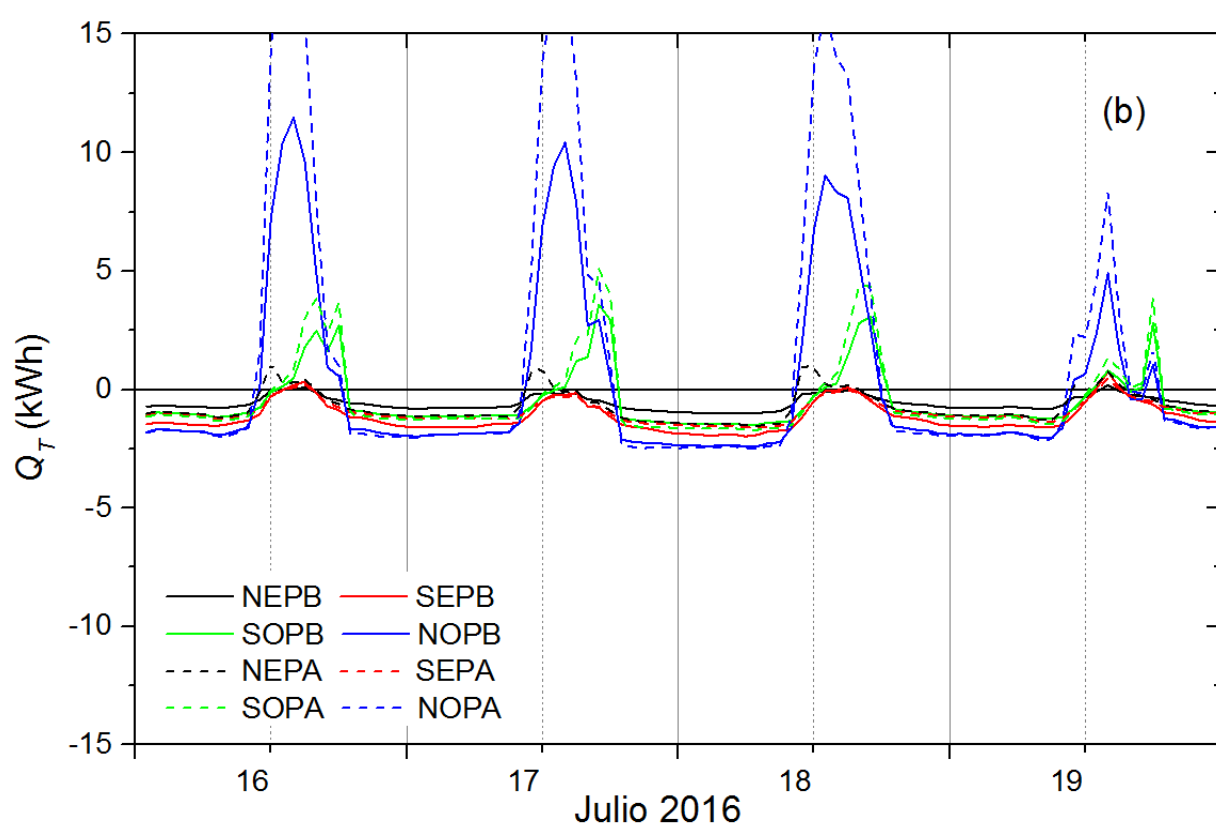
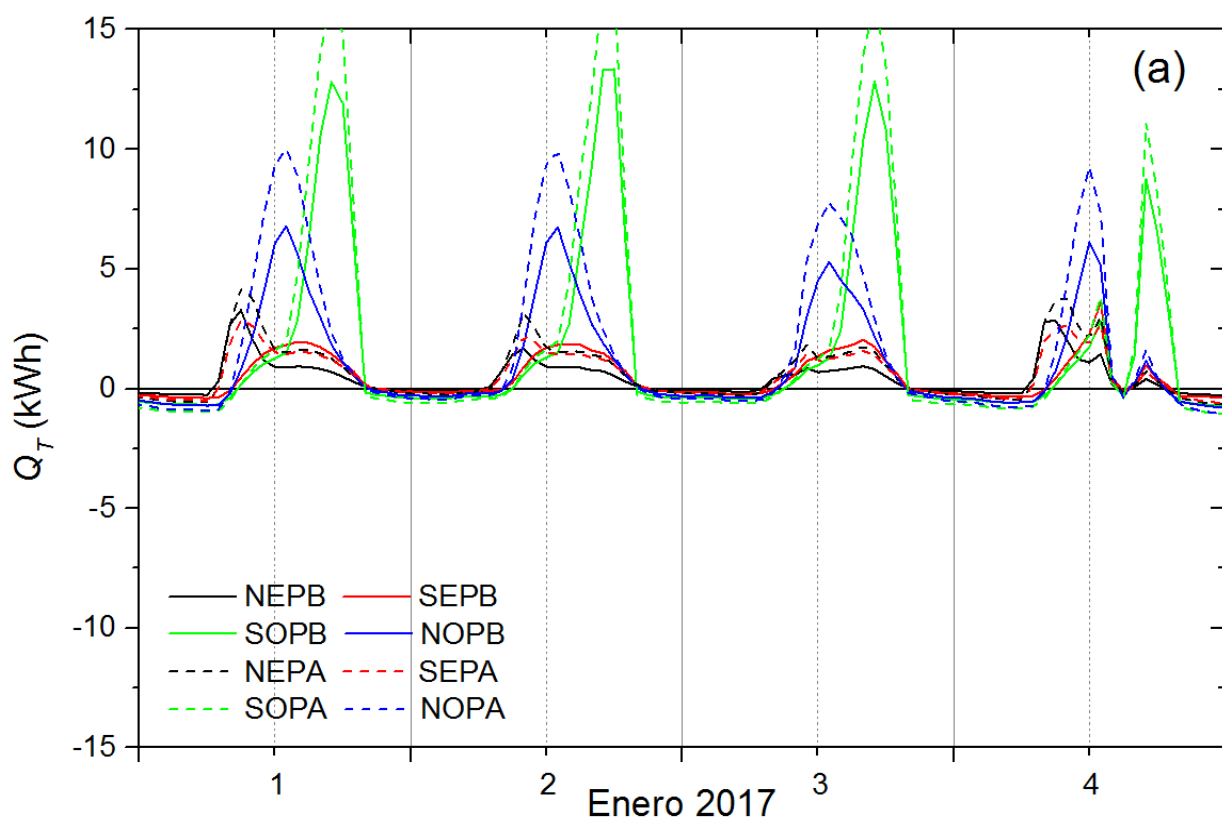


Figura 6-13: Flujo de calor transmitido hacia el interior del edificio a través de las superficies vidriadas en verano (a) e invierno (b).

radiación solar les impacta plenamente). En la PA, el ingreso de calor siempre es mayor que en la PB. En invierno (Fig. 6-12b), los aleros de la fachada frontal permiten un ingreso importante de calor al mediodía mientras disminuyen el calor ingresado por los paneles vidriados orientados al SO. El calor total entrante de esta forma compensa en buena medida el calor perdido durante la noche.

Otro aspecto importante para analizar es el intercambio de calor a través de la lucarna que corona el atrio central. En la Figura 6-14 se representa el calor total transmitido por todos los mecanismos posibles. A pesar de su tamaño reducido frente al área total del techo, en verano (Fig. 6-14a), el edificio gana 1.5 kWh promedio diario por esta superficie mientras que pierde 0.15 kWh en invierno (Fig. 6-14b).

6.4 Efecto de la ventilación natural

Cuando se simula la temperatura T_i considerando al edificio cerrado y con los ventiletes de los cerramientos vidriados abiertos durante el día o solamente durante la noche, no se observan diferencias apreciables, lo cual indica la escasa posibilidad de ventilar el interior del edificio. Como ya se mencionó, $T_i \approx 29^\circ\text{C}$ bajo condiciones atmosféricas propias del verano, muy por encima del nivel de confort. Sin embargo, esto cambiaría si la lucarna y los ventiletes se abrieran completamente durante la noche (entre la hora 21:00 y la 8:00), y se mantuvieran cerrados durante el día. La Figura 6-15 muestra los resultados cuando se implementa la ventilación conducida por diferencia de temperatura (efecto chimenea), y se agrega la ventilación conducida por el viento (ventilación cruzada). Como se deduce de estos resultados, existe la posibilidad de refrescar el interior de la Biblioteca Central en más de 5°C si se recurre a la ventilación nocturna en verano abriendo completamente la lucarna. En este caso, T_i se ubica mayormente dentro del rango de confort térmico. Sin embargo, si se agrega el calor generado por las luminarias y por 30 personas entre la 08:00 y la 20:00, al mediodía se superaría la temperatura máxima de confort (Figura 6-16).

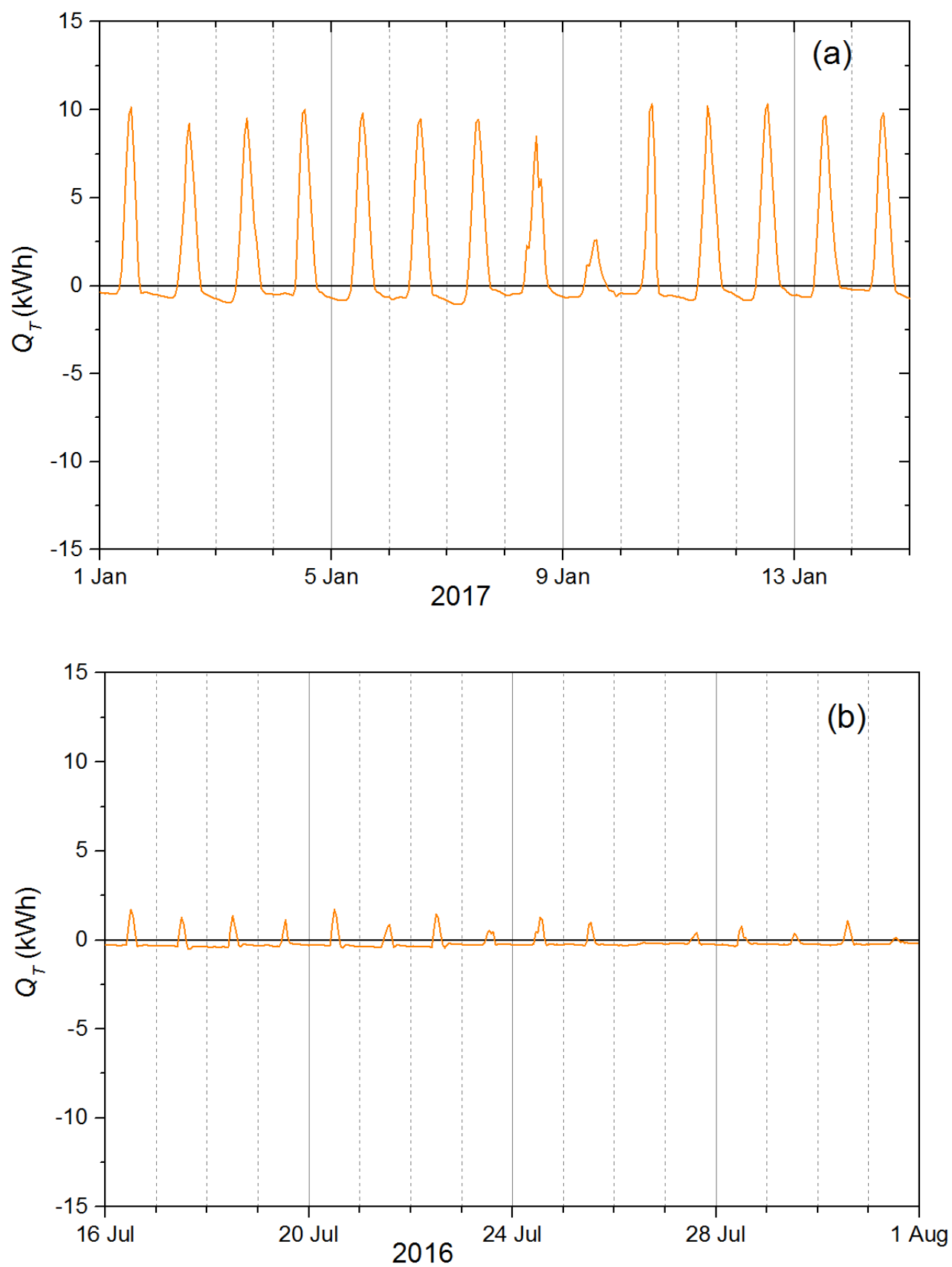


Figura 6-14: Intercambio de calor a través de la lucarna en verano (a) e invierno (b).

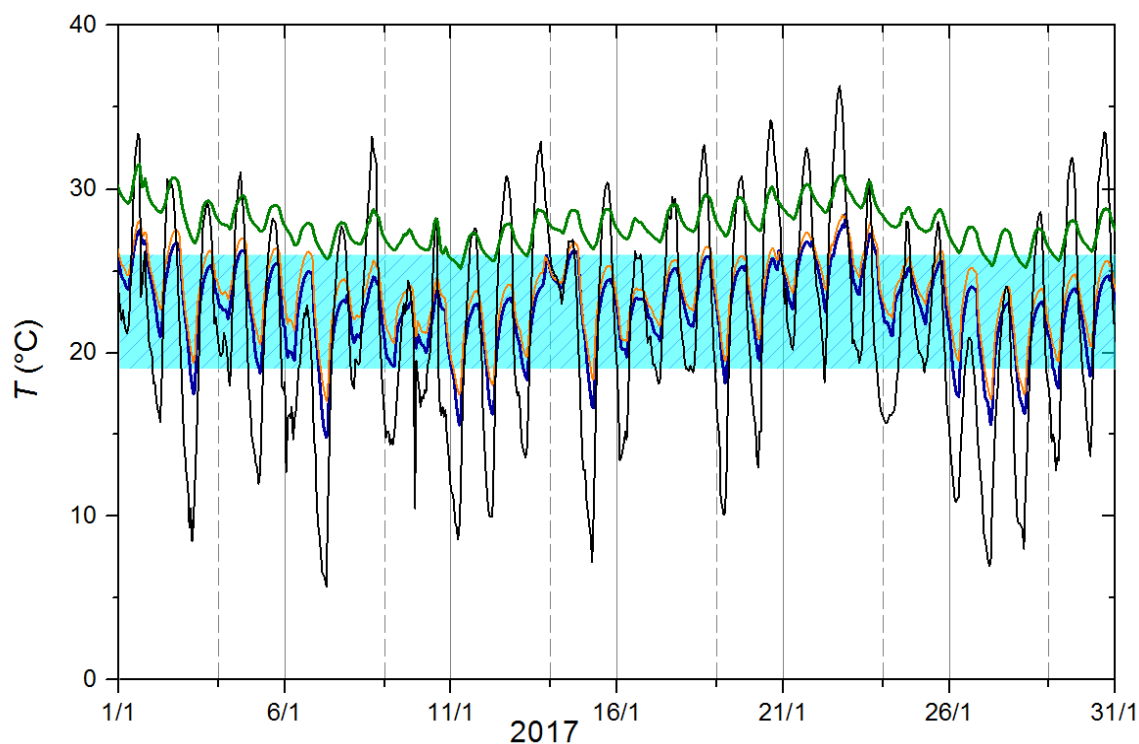


Figura 6-15: Evolución de la temperatura externa (línea negra), y la temperatura interna promedio simulada cuando las aberturas se abren en su totalidad considerando el efecto stack únicamente (línea naranja) y el efecto stack y el viento (línea azul). La línea verde representa T_i simulada con todo el edificio cerrado. La zona sombreada corresponde a la zona de confort térmico.

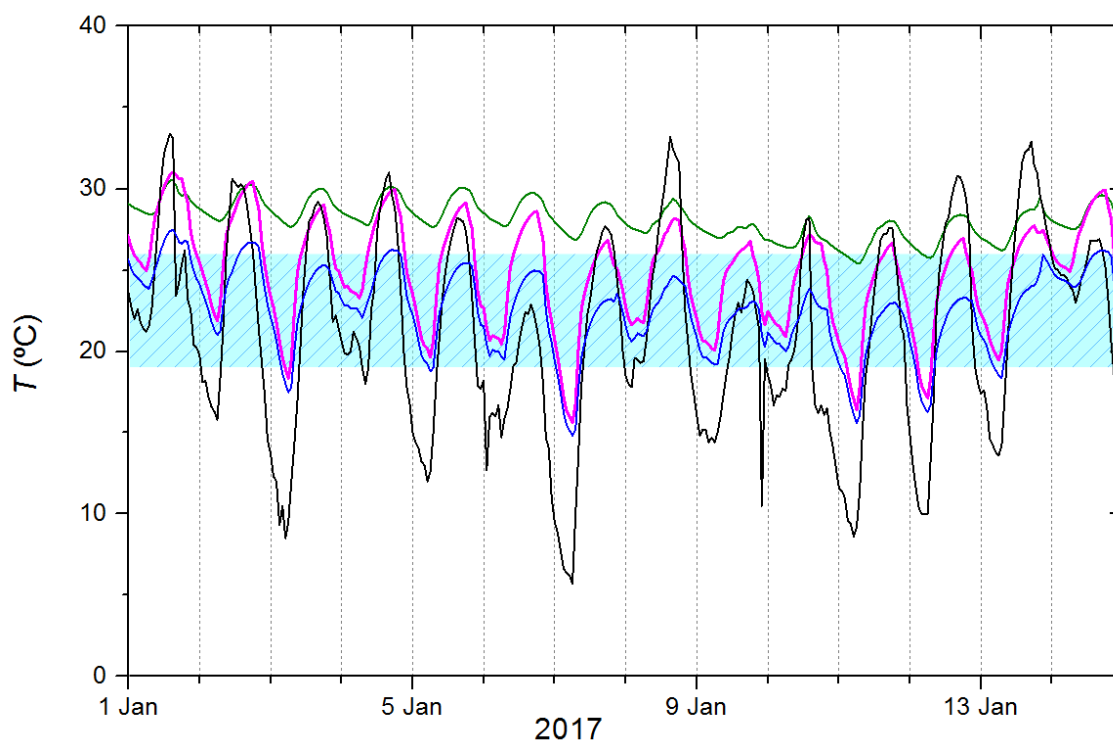


Figura 6-16: Evolución de la temperatura externa (línea negra), la temperatura interna promedio simulada considerando el efecto stack y el viento (línea azul), la temperatura interna promedio simulada cuando se encienden las luminarias y se considera la presencia de personas (línea magenta). La línea verde representa T_i simulada con todo el edificio cerrado. La zona sombreada corresponde a la zona de confort térmico.

7. DISCUSIÓN Y OBSERVACIONES

7.1 Análisis de las metodologías desarrolladas

Se desarrollaron metodologías para el cálculo del flujo de calor a través de la envolvente del edificio de la Biblioteca Central, cuya aplicación resultó novedosa para evaluar el comportamiento térmico de una construcción pre-existente y comprobar la efectividad de las recomendaciones de las normas (IRAM y otras) a considerarse en la etapa de diseño. Una evaluación de las ventajas y limitaciones de cada una de ellas se ofrece a continuación.

★ Termografía infrarroja

Las mediciones con cámaras termográficas aprovechan que las capas de aire próximas a la superficie son transparentes a la radiación IR que emiten las superficies en distancias cortas, haciendo posible obtener información in-situ que es difícil de lograr por otra vía, como por ejemplo, la temperatura de grandes superficies que componen la envolvente edilicia. Estas mediciones pueden aprovecharse de diferentes formas. En la investigación involucrada en esta tesis, las temperaturas superficiales se emplean para validar y/o ajustar apropiadamente los parámetros asociados al cálculo de la irradiancia solar local, cuantificar el cambio de las resistencias de las capas límite de aire, y detectar la acumulación de calor en los muros debida a la radiación solar. Por su parte, las mediciones termográficas sobre superficies vidriadas requieren cuidados especiales debido a que las imágenes IR incluyen las reflexiones de la radiación proveniente de objetos circundantes y de la radiación visible desde el interior del edificio.

Las mediciones termográficas realizadas son puestas en valor mediante el postulado de modelos teóricos basados en conceptos físicos. En particular, el modelo analítico propuesto en §4.1 permite calcular las resistencias de las capas superficiales de aire durante el día en diferentes partes de la edificación. La importancia de esto reside en que tales resistencias son necesarias para determinar la transmitancia térmica global U . Un cálculo erróneo de R_{si} , por ejemplo, podría subvalorar el riesgo de condensación superficial y de la formación de colonias de hongos en las paredes internas que podrían afectar la salud de los ocupantes. Se encontró que los valores de las resistencias térmicas de las capas límite de aire pueden ser mucho mayores que los sugeridos por las normas, lo que reduce significativamente la conductividad térmica efectiva de la envolvente con respecto al valor de diseño. También se encontró que estos valores varían significativamente durante el día causando fluctuaciones importantes de los valores medidos de U .

Por otra parte, las temperaturas T_{se} y T_{si} medidas en forma independiente permiten calcular el flujo de calor q y relacionarlo con la diferencia ($T_{sol-aire}-T_i$) correspondiente al momento de la

medición. Una gran cantidad de mediciones permiten compensar las fluctuaciones estadísticas y las debidas al comportamiento dinámico del muro, y calcular U para cada componente de la envolvente. Si bien q y $(T_{sol-aire}-T_i)$ dependen del momento del día y la orientación del sector analizado, se encuentra que U encontrado de esta forma depende sólo del tipo de construcción y de los materiales. En consecuencia, el peso de otros factores es neutralizado con la estadística de un número adecuado de datos. Además, este resultado es una comprobación adicional de que los cálculos de q que contemplan el efecto de la radiación solar sobre el proceso de la conducción térmica son correctos cuando se introduce la temperatura equivalente $T_{sol-aire}$.

Con los valores de U obtenidos aplicando la TTIR, se determinaron los valores representativos del flujo de calor por conducción a través de las superficies planas verticales de ambas plantas del edificio evaluado. Se encuentra que la resistencia térmica de los materiales es similar a las resistencias superficiales tanto en los vidrios como en los muros ante la ausencia de radiación solar. Dicho de otra forma, la resistencia térmica global $R_T = U^{-1}$ de la envolvente es alrededor del doble de la resistencia térmica de los materiales debido a las capas superficiales de aire externa e interna. Considerando que el modelo propuesto contempla que el efecto de la radiación solar puede introducirse reemplazando T_e por $T_{sol-aire}$, el flujo total de calor hacia el interior se compone de las contribuciones debidas a los procesos de conducción (Fig. 5-4) y radiación en el caso de los materiales opacos. Si bien los resultados reportados son válidos para la Biblioteca Central bajo las condiciones de medición descritas en §3.2.2, la metodología desarrollada puede aplicarse a otros tipos de envolvente, obteniéndose valores cuantitativos del flujo q a través de ellas en edificios pre-existentes y en el mismo lugar de emplazamiento.

★ Método de la admitancia

Para lograr el objetivo de disminuir las pérdidas y ganancias de calor en cualquier edificación, es necesario mejorar su aislación térmica lo cual conlleva una mayor complejidad en la construcción de los muros que deben componerse de múltiples capas de diferentes materiales. Así, la aislación resultante suele evaluarse calculando la conductividad y transmitancia térmicas en el estado estacionario, soslayando los cambios de la temperatura externa durante el día que establecen un flujo no estacionario de calor.

Para hallar la respuesta térmica dinámica a una variación periódica de temperatura de una envolvente constituida por múltiples capas, en esta investigación se revisaron la teoría y las hipótesis asociadas con el método de la admitancia, usado recurrentemente para resolver otros problemas de la física. Como resultado de su aplicación se obtiene la matriz de transmisión que relaciona las temperaturas y los flujos de calor en las superficies externa e interna del muro en función de su espesor y de la densidad, calor específico y conductividad de los materiales empleados. El álgebra de matrices de números complejos facilita el tratamiento matemático, a la vez que no se pierden de

vista los principios físicos que subyacen en cada etapa de la resolución del problema. El método se aplica al cálculo y al análisis de los factores dinámicos de la respuesta a las variaciones de la temperatura externa para muros típicos, adquiriendo especial interés para nosotros el caso del edificio de la Biblioteca Central. El análisis teórico desarrollado pone de relieve la selección de los materiales y su disposición en el interior del muro, información que suele permanecer implícita u oculta cuando se emplean códigos numéricos y/o planillas de cálculo simplificadas.

De la evaluación del comportamiento térmico de muros de diferente espesor y composición, se infiere que los muros dobles con aislación interna reducen notablemente el flujo de calor desde el exterior, tanto por su mayor resistencia térmica como por su comportamiento dinámico. La superficie externa intercambia un mayor flujo de energía con el ambiente producto de su capacidad calorífica que le permite absorber y luego liberar la energía, pero este fenómeno se da principalmente en los 0.10 m externos del muro, siendo muy reducido el flujo neto hacia el interior. En cambio, los muros simples de 0.15 m de espesor y las superficies vidriadas no tienen un comportamiento dinámico importante y el flujo de calor es determinado sólo por la conductividad, independientemente de la densidad y la capacidad calorífica del material. El comportamiento dinámico puede despreciarse incluso en los DVH de 0.012 m de espesor, ya que se constata que el flujo de calor sigue la evolución de la temperatura externa sin desfase apreciable. Además, como la conductividad suele ser mayor en las superficies vidriadas que en los muros, la respuesta térmica de los edificios como el de la Biblioteca Central es determinada fundamentalmente por la respuesta de las superficies vidriadas. Así, el comportamiento dinámico beneficioso de los muros dobles es contrarrestado por la respuesta de las superficies vidriadas de la envolvente.

★ Modelo de Regresión Lineal Múltiple

Una de las etapas de la investigación consistió en el análisis de los resultados del monitoreo térmico de la Biblioteca Central realizado durante el periodo del año que presenta la menor influencia del factor humano (asistencia de usuarios y personal administrativo, uso de acondicionadores de aire, etc.) sobre la gestión del edificio, y el mayor desafío para evaluar el confort térmico (CT) de las instalaciones. De este modo, se pudieron evaluar las características térmicas del edificio durante el periodo estival sin las incertezas introducidas por el número y comportamiento de los usuarios/ocupantes, y las fuentes de calor encendidas (computadoras, luces, etc.) entre otros factores. Se calcularon las contribuciones de los diferentes mecanismos de intercambio de calor con el exterior para condiciones reales de funcionamiento, distinguiendo el comportamiento por plantas. Algunos de los cálculos presentados son similares a los realizados para evaluar térmicamente las edificaciones con los métodos dictados por las normas. Sin embargo, no usamos las mediciones convencionales para obtener las resistencias térmicas de los componentes constructivos y evaluar el intercambio energético, sino que relacionamos matemáticamente, y en forma simultánea, la

evolución de T_i con todas las variables relevantes disponibles (i.e., los datos registrados por las estaciones meteorológicas y las mediciones *in-situ*) en el marco de la resolución de problemas inversos (§4.5). Así se encuentran resultados que no pueden obtenerse aplicando las normas. Por ejemplo, se cuantifica la importancia de cada proceso de intercambio de calor por medio del valor relativo de los coeficientes representativos de cada zona o planta del edificio. Además se obtienen los tiempos característicos de respuesta asociados con cada proceso. La ligera estratificación del ambiente interno manifestada por el monitoreo está vinculada a una diferente exposición de cada planta a las condiciones atmosféricas. La evolución de T_i en función de estas condiciones se obtiene integrando una ecuación diferencial ordinaria. Luego, los resultados se obtienen mucho más sencillamente que mediante las simulaciones numéricas realizadas en §6, y sin necesidad de determinar todos los parámetros asociados con todas las componentes de la envolvente.

La metodología empleada no substituye la resolución del problema directo establecido por las normas IRAM que debe efectuarse de todos modos por ser de cumplimiento obligatorio en varias provincias argentinas y recomendado en las restantes. El método inverso resulta útil para evaluar el comportamiento térmico de edificaciones pre-existentes disponiendo de pocos datos. A su vez, la aplicación de la regresión simultánea con múltiples variables mostró ser indispensable para la resolución del problema inverso, ya que los resultados dependen del orden de la secuencia en la cual se hacen las regresiones lineales simples corrientemente usadas en la evaluación térmica de edificios. Esto implica que los procesos físicos asociados a cada variable están relacionados entre sí, de modo que lo más conveniente es determinar todos los coeficientes en forma simultánea. El MRLM permite realizar fácilmente esta determinación, lográndose una rápida caracterización térmica del edificio en condiciones reales de uso a partir de mediciones de la temperatura interior y datos de estaciones meteorológicas cercanas.

La alta variabilidad de la derivada temporal de la temperatura interior agrega una dificultad adicional que se refleja en el coeficiente de determinación estadística R^2 . El valor más grande ($R^2 = 0.62$ para los datos analizados) se obtiene con el MRLM; es decir, éste es el método con el que se consigue la mayor correlación posible. Si el ajuste se hace en forma secuencial con un orden de importancia decreciente (orden de secuencia 1), el ajuste lineal con la primera variable independiente tiene un R^2 similar (0.62 y 0.58 para PB y PA respectivamente), pero con el resto de las variables los R^2 son muy pequeños (< 0.04). A pesar de ello, todos los coeficientes de la Ec. (4.73) hallados de esta forma son muy similares a los encontrados con el MRLM.

Los coeficientes son significativamente diferentes de los obtenidos con el MRLM si se utiliza un ajuste secuencial en otro orden. También, los R^2 de todos los ajustes lineales de la secuencia son menores que la mitad (< 0.31) del valor correspondiente al MRLM, confirmando que existe una baja correlación con este orden distinto del que es conveniente. El coeficiente de determinación estadística $R^2 = 0.62$ explica el 62% de la varianza de los datos. Este valor es aceptable teniendo en

cuenta la variabilidad que representa trabajar con una derivada y datos meteorológicos que varían durante el día. Además, las desviaciones estándar encontradas son pequeñas frente a los respectivos coeficientes.

En consecuencia, el MRLM posibilita determinar la importancia relativa de los diferentes procesos físicos en la variación de T_i . En el caso del edificio de la Biblioteca Central, durante el verano la radiación solar da cuenta de más del 50% de la variación de temperatura, seguida por la conducción del calor a través de la envolvente y la convección debida al viento (15% cada una, aproximadamente). Comparando los coeficientes correspondientes a PA y PB, se observa que la radiación solar es captada en mayor medida por la PA. La conducción del calor tiene un efecto inverso en cada planta, esto es, en PA se pierde y en PB se gana calor en promedio, probablemente por la mayor temperatura del aire en PA con respecto a la temperatura en PB. El viento también produce un mayor efecto sobre T_i en PA que sobre aquella en PB. Los efectos de la diferencia de la humedad específica entre el aire exterior e interior son mucho menos importantes que los de $(T_e - T_i)$ e I_{tr} , lo cual sugiere un cambio energético por ventilación natural mucho menor que el debido a la transferencia de calor por radiación y conducción. Esto concuerda con la baja proporción del área cubierta por las aberturas con respecto al área total de la envolvente, y con el sobrecalentamiento que presenta el edificio en verano.

★ Empleo de la temperatura equivalente sol-aire

La radiación solar que incide en forma diferencial sobre las distintas componentes constructivas de la envolvente edilicia altera la transferencia de calor por conducción a su través debido a la diferencia de temperatura entre el exterior e interior. En efecto, la temperatura superficial puede aumentar a lo largo del día (a medida que la radiación solar aumenta) hasta alcanzar valores mucho mayores al de la temperatura ambiente, e incluso cambiar la dirección del flujo de calor sobretudo en componentes edilicias que, por su orientación, están más expuestos a la radiación solar. En esta investigación, este efecto se considera mediante el empleo de la temperatura equivalente $T_{sol-aire}$ que combina T_e , I_{tr} y R_{se} . La $T_{sol-aire}$ implica considerar la radiación solar directa, la difusa y la reflejada. En §4.3.3 se comparan los resultados obtenidos al aplicar el modelo teórico de cielo claro y el de Liu-Jordan que emplea la radiación global horizontal medida en una estación meteorológica cercana. Los modelos que emplean mediciones presentan incertezas significativas debido a que los radiómetros deben mantenerse y calibrarse periódicamente. La irradiancia incidente sobre los muros orientados al N puede calcularse teóricamente aplicando el modelo de cielo claro (§4.3.1) considerando los efectos de las condiciones climáticas locales. Para los muros orientados al S (y también para aquellos orientados al N) conviene calcular la radiación directa y la difusa en base a las mediciones por medio del método de Liu-Jordan. Cualquiera sea el método elegido, hay coeficientes y aproximaciones que, en definitiva, introducen incertezas sobre los

resultados, las que pueden estimarse usando TTIR para corroborar y/o ajustar los coeficientes. Para los datos analizados para esta tesis, se encontró que los resultados de ambas formas de cálculo de I_t introducen una dispersión de los puntos similar a la encontrada para T_{se} (§4.3.3), aunque este es un tema que debe corroborarse con datos colectados durante varios años.

El empleo de $T_{sol-aire}$ permite incluir directamente en el análisis los efectos de la radiación solar sobre la transferencia térmica a través de la envolvente. La Figura 5-9 muestra como T_{se} aumenta hasta un valor mucho más grande que el de T_e . Cuando se presentan valores de T_e en el rango 10°C–27°C en primavera y otoño, lo cual es típico de climas templados, se obtiene T_{se} de hasta 45°C cuando la radiación solar incide directamente sobre los muros. En verano e invierno, la situación es crítica debido a que tanto la temperatura externa como la radiación solar sobre las paredes verticales, respectivamente, son elevadas. Esto causa un importante aumento del flujo de calor hacia el interior, el cual debe considerarse en el cálculo de las ganancias y pérdidas de calor por conducción a través de la envolvente. Como se muestra en §5.3.1, es posible calcular la temperatura superficial de las paredes expuestas a una alta radiación solar en diferentes momentos del día y estaciones, y compararlas con las mediciones termográficas realizadas in situ, obteniéndose un acuerdo satisfactorio. A partir de $T_{sol-aire}$ y la medición de T_i , se obtiene el flujo q_e a través de la pared resolviendo numéricamente la ecuación del calor (Ec. 4.10). Como resultado, este flujo térmico introduce una diferencia de temperatura ($T_{sol-aire}-T_{se}$) que es indicativa del impacto de la radiación solar sobre el calor realmente transferido al interior del edificio. La dispersión de los puntos experimentales en la Figura 5-12 se explica parcialmente por la diferencia entre la intensidad de la radiación solar, ya sea la calculada o la medida en la estación meteorológica, y la efectivamente absorbida por la pared. De hecho, el valor de I_t a un tiempo cercano a aquel en el que se efectúa la medición termográfica no toma en cuenta la evolución de la irradiancia real, y este es un factor importante a considerar cuando se evalúa una pared con alta inercia térmica. Además, posibles variaciones de h_e también influyen la dispersión de los puntos en la Figura 5-12. Estas variaciones se deben a cambios en la intensidad y dirección del viento, temperatura, humedad, forma de la envolvente y obstáculos circundantes (e.g. árboles, otros edificios). Los cambios en h debidos al viento podrían considerarse adoptando la Ec. (4.69), a los cuales hay que agregar los cambios correspondientes a la transferencia de calor por radiación.

★ Solución numérica la ecuación del calor

Para paredes con un alto coeficiente de difusión térmica D , la relación entre T_{se} y T_e depende también del comportamiento dinámico del muro. Es decir, el flujo de calor q_e afecta esta relación, y a su vez q_e depende de la evolución de la temperatura de las diferentes capas del muro. En esta investigación relacionamos T_{se} y T_e por medio de la resolución numérica de la ecuación de difusión del calor. Mostramos que la resolución con el tradicional y más simple método de diferencias finitas

de segundo orden en el espacio y explícito en el tiempo es suficiente para resolver dicha ecuación sin demasiados inconvenientes con un nivel intermedio de conocimiento de cálculo numérico. La determinación de q_e resolviendo numéricamente la ecuación del calor en el régimen no-estacionario y usando T_e y T_i reales (además de I_i) es crítica para obtener T_{se} correctamente, especialmente cuando se analizan paredes con alta inercia térmica. Aun cuando usamos un código de simulación simple programado en *MATLAB*, otros códigos y subrutinas en Fortran, *C++* y otros lenguajes están disponibles para resolver la Ec. (4.10) con las CC dadas por (4.56) y (4.58). También se dispone de softwares comerciales para la resolución numérica de ecuaciones diferenciales asociadas con la transferencia de calor a través de la envolvente edilicia. Estos softwares usan métodos diferentes, tales como esquemas de diferencias finitas explícita (Asan y Sancaktar, 1997) o implícita (Ozel y Pihtili, 2007), método de elementos finitos (Chen y Krokosky, 1976), esquemas de volúmenes finitos implícito (Al-Sanea, 2003) o explícito (Barrios et al., 2012), método espectral (Gottlieb y Orzag, 1977), y otros métodos basados en analogías con circuitos térmicos (Kontoleon y Bikas, 2007), funciones de transferencia (Gasparella et al., 2011), etc. Otros métodos o esquemas para aproximar la derivada temporal permiten obtener una mejor resolución y/o ser más eficiente computacionalmente; sin embargo, ellos pueden requerir un mayor conocimiento de programación. Para el caso de estudio tratado en este trabajo, el código no es importante, sólo su correcto uso conociendo sus limitaciones y errores.

Comúnmente, la Ec. (4.11) se usa para determinar la transferencia de calor a través de un medio homogéneo. En este caso, el comportamiento del medio se describe bien con la difusividad térmica D que relaciona la conductividad térmica, la densidad y el calor específico del material. Si el medio es no-homogéneo, λ y ρC_p deben considerarse por separado de acuerdo a la Ec. (4.10). Ambos parámetros determinan el correcto comportamiento térmico de cada capa de material y, en definitiva, las características dinámicas del muro completo. La clásica Ec. (4.11) cambia a la forma de Ec. (4.10), y entonces es necesario modificar los códigos estándares de simulación que están preparados para resolver la Ec. (4.11). En caso contrario, el flujo de calor a través de las diferentes interfaces internas no satisface las Ecs. (4.6) y (4.10), o lo hace con un gran error, y resultados incorrectos pueden obtenerse si las características térmicas de las capas que componen la pared son significativamente diferentes.

Otro punto crítico de la simulación numérica es la elección de las CI y CC. Las capas límites de aire de las superficies interna y externa de la pared son consideradas mediante los respectivos coeficientes de transferencia de calor h o, en forma equivalente, mediante las resistencias térmicas superficiales R_s . Esto permite empalmar T_e y T_i con T_{se} y T_{si} respectivamente, lográndose la necesaria conservación del flujo de calor en las capas límite a pesar de las muy diferentes características térmicas del aire y del muro.

Los resultados de la simulación numérica de la transferencia de calor por conducción a través de los dos muros analizados en §5.4 indican que las fluctuaciones de T_e tardan varias horas en manifestarse sobre la superficie interna. Para el muro de ladrillo hueco revocado, la resistencia $R_T = 0.63 \text{ m}^2\text{°C/W}$ es menor que la del muro doble para el que $R_T = 1.75 \text{ m}^2\text{°C/W}$, por lo que el flujo de calor por conducción que lo atraviesa experimenta una menor reducción bajo los efectos de la variación diurna de T_e , aun cuando tenga menor capacidad calorífica ρC_p .

★ Aplicación del programa *EnergyPlus*

La simulación empleando el programa *EnergyPlus* permitió realizar el balance térmico general del edificio, considerando todas sus partes y todos los procesos físicos simultáneamente. No sólo se validaron los modelos analíticos propuestos para describir situaciones específicas, sino que se obtuvieron resultados que exceden los de dichos modelos. En particular, *EnergyPlus* ofrece más detalles del balance térmico y radiativo de las superficies vidriadas; no obstante, el balance térmico general es también razonablemente descrito por los resultados reportados en §5.

La simulación efectuada permite integrar mucha información (e.g. meteorológica, geométrica, sobre las propiedades físicas de los materiales de construcción, localización) para describir la evolución global de, por ejemplo, la temperatura T_i y el calor intercambiado con el exterior, ya sea para analizar el comportamiento higo-térmico del edificio, evaluar su sustentabilidad energética, proponer cambios razonables del diseño (e.g. realizar ampliaciones, agregar aberturas) y/o probar estrategias de ventilación ante situaciones meteorológicas extremas. Sin embargo, los resultados globales así obtenidos pueden esconder defectos constructivos que atentan contra el establecimiento de las condiciones para alcanzar el CHT. En estos casos, el análisis particular de los procesos físicos involucrados en partes de la envolvente es necesario para poner en evidencia los detalles de interés.

7.2 Descripción térmica del edificio evaluado

Se encuentra que los muros de la envolvente contribuyen en forma importante al intercambio energético global con el ambiente externo. Los resultados encontrados en §5.4.1, §5.4.3 y §6.3.2 concuerdan en que el intercambio de calor en el interior de los muros se produce fundamentalmente en la capa de ladrillo visto que se encuentra aislada del interior. Por lo tanto, el intercambio energético con el exterior generado a través de los muros no afecta significativamente las condiciones internas. Por el contrario, la contribución del intercambio de calor a través de las superficies vidriadas es más significativa puesto que afecta el interior del edificio haciendo subir y bajar T_i según los resultados mostrados en §5.1.2 y §6.3.2. De igual forma, el tiempo de respuesta térmica del edificio completo proporcionado por la simulación coincide con el reportado en §5.1.3.

Uno de los factores que requiere ser considerado en la evaluación térmica de un edificio es la respuesta dinámica de la envolvente en su conjunto, ya que los muros y los DVH tienen una respuesta dinámica diferente. Encontramos una diferencia temporal significativa entre las variaciones de temperatura sobre las superficies interna y externa de las paredes perimetrales, y entre las variaciones de la temperatura y el flujo de calor. La reducción y retraso de la transferencia térmica experimentados por la envolvente de la Biblioteca Central se cuantificaron por medio de los correspondientes factores de decremento y retraso temporal. Estos parámetros no son importantes cuando se analiza el flujo calórico a través de los paneles con DVH que componen las numerosas ventanas y puertas del edificio. Las superficies vidriadas se comportan como elementos puramente resistivos y el flujo de calor es proporcional, instante a instante, a la diferencia de temperatura entre el exterior y el interior. Considerando las respectivas transmitancias y las superficies de los muros y DVHs que componen la envolvente, encontramos que el aporte al calor ingresado o egresado por conducción a través de las superficies vidriadas es el 83% del total si se considera el flujo de calor en régimen estacionario, y es el 88% si se consideran las transmitancias dinámicas, evidenciando que las superficies vidriadas son los mayores contribuyentes a la pérdida de calor por conducción.

Aportes adicionales a los modelos analíticos y numéricos pueden realizarse a partir de las mediciones in situ y un análisis estadístico adecuado. Los resultados obtenidos aplicando el MRLM y las simulaciones con el programa *EnergyPlus* evidencian una ligera estratificación vertical y uniformidad térmica horizontal en el gran atrio central, consecuencia directa del diseño arquitectónico y materiales empleados en la construcción, que domina el micro-clima en otros espacios (más reducidos) del edificio. Las condiciones térmicas del interior reflejan que el ambiente se encuentra fuera de la zona de confort durante los periodos estivales. La ganancia de calor del edificio se genera fundamentalmente a través de las superficies vidriadas (Figura 6-13) mientras que el techo permite evacuar buena parte del calor interno por emisión de radiación IR en forma sostenida durante la noche. Durante el día, una parte de la radiación solar directa que es absorbida por la superficie de la terraza también se emite en forma de radiación IR al ambiente exterior, disminuyendo así la influencia de la radiación solar sobre el calor ingresado al interior (Figura 6-12). Como se mencionó anteriormente, los muros intercambian una significativa energía con el ambiente externo, almacenando calor durante el día y evacuándolo durante las noches, aunque este intercambio no afecta significativamente T_i . También se encuentra que el efecto de la humedad específica interna y de la externa no mejora la correlación entre las variables involucradas en el MRLM, lo cual sugiere una escasa ventilación confirmada por las simulaciones con *EnergyPlus*. En invierno, las principales pérdidas se producen por las superficies vidriadas y el techo. En los días invernales sin nubosidad, la radiación solar ingresa al interior compensando sólo parcialmente las pérdidas de calor producidas durante la noche. Por lo tanto, el CT en los días fríos sólo puede alcanzarse usando una importante cantidad de calefacción por medios mecánicos (Figura 6-5).

En resumen, el edificio de la Biblioteca Central puede caracterizarse térmicamente como sigue:

- Existe una leve estratificación del aire en el atrio central.
- Existe enfriamiento excesivo (debido a una importante pérdida de calor) en invierno que debe balancearse con el encendido de equipos de calefacción.
- Existe sobrecalentamiento en verano, compensado parcialmente (en recintos pequeños y aislados del atrio central) con el uso de equipos de aire acondicionado.
- Si bien los muros de la envolvente cumplen con las disposiciones de las normas IRAM para la región geográfica, la gran cantidad de superficies vidriadas (especialmente sobre la fachada frontal), y a pesar de tratarse de paneles DVH, hace inviable lograr el CT en invierno y difícil en verano sin tener que recurrir a dispositivos mecánicos de control de temperatura.
- Es imposible implementar la estrategia de ventilación natural eficientemente debido a la hermeticidad de la lucarna.

7.3 Valoración de las normas técnicas

Las normas estándares para la zona geográfica en la que se encuentra Tandil exigen condiciones mínimas de aislación térmica y su cumplimiento conlleva un diseño constructivo que no necesariamente asegura un bajo consumo energético global para la gestión de los edificios con respecto a los estándares internacionales y a los costos actuales de la energía en Argentina. La razón para que esto ocurra es que la aislación afecta sólo una parte del balance energético; la calidad, área total y disposición de las superficies vidriadas, la masa térmica global, las propiedades de emisión y absorción radiativa de la envolvente, la ventilación natural y la importancia relativa de cada uno de estos factores en el balance energético global también son relevantes y deben sopesarse convenientemente. El análisis físico de los diferentes mecanismos de transferencia de calor a través de la envolvente de un edificio permite estimar su comportamiento térmico global y su capacidad de respuesta bajo diferentes condiciones y, en consecuencia, conocer las ventajas y debilidades de cada diseño para plantear propuestas concretas que contribuyan a la disminución del consumo energético adaptado al uso del edificio y lugar de emplazamiento. En particular, para la zona centro-bonaerense, los inviernos y veranos, así como los recurrentes cambios abruptos de las condiciones atmosféricas en cualquier momento del año, resultan factores problemáticos para el diseño de construcciones energéticamente sustentables.

Las normas IRAM especifican los requerimientos básicos de las construcciones. Los valores de diseño se basan en las temperaturas externas para invierno y verano obtenidas a partir de datos climáticos de las diferentes zonas bio-ambientales de Argentina (IRAM 11603). Como se menciona en §3.1, Tandil está comprendida en la zona templada fría IVc de transición entre la sub-zona de máxima irradiancia (i.e. provincia de La Pampa) y la marítima (i.e. zona costera de la provincia de Buenos

Aires). Las normas ofrecen *recomendaciones* generales para el diseño que propenden a evitar el traslado de las amplitudes térmicas externas al interior (principalmente en verano cuando se tienen las mayores amplitudes) por medio de una buena inercia térmica, y prever una protección solar eficiente en el verano. También ofrecen recomendaciones particulares de asoleamiento invernal para asegurar niveles mínimos de aporte de energía solar, tomando en cuenta la variación de irradiancia directa según la altura del sol en el horizonte, y aconsejando el uso de sistemas de protección de la radiación solar en verano (e.g. parasoles horizontales y verticales, cortinas de enrollar de color claro para todas las orientaciones excepto hacia el S). Respecto de la ventilación, se recomienda controlar la infiltración de aire durante el período invernal y favorecer la ventilación cruzada durante el verano (Czajkowski y Gómez, 1994). Aun cuando es posible cumplir con los requerimientos y recomendaciones de las normas IRAM para el diseño y construcción de edificaciones, el consumo energético implicado en la gestión del edificio para lograr el CHT durante todo el año puede terminar siendo importante.

En este trabajo de investigación estudiamos el comportamiento térmico de un edificio construido bajo los estándares técnicos recomendados para la región geográfica de pertenencia y en condiciones reales de uso. A pesar del cumplimiento efectivo de las normas técnicas, encontramos diferencias significativas con respecto a los valores de diseño en los valores de las resistencias térmicas superficiales, el comportamiento dinámico de la parte opaca de la envolvente, el comportamiento térmico dominante de las superficies vidriadas, y la consideración de los efectos de la radiación solar directa y difusa in situ y para cada orientación. Luego, se deduce la importancia de la caracterización térmica detallada de los edificios en condiciones reales de uso y el análisis crítico de los mecanismos de transferencia de calor para conocer las cargas térmicas efectivas en verano y en invierno, de modo de sentar las bases para proponer cambios que reduzcan el consumo de energía dedicada al lograr el CT como se hace a continuación.

7.4 Propuesta de cambios para alcanzar el CT reduciendo el consumo energético

Del análisis de los resultados encontrados aplicando las diferentes metodologías analíticas desarrolladas, de la resolución numérica de la ecuación del calor en los muros, y de la simulación numérica del comportamiento térmico global del edificio surge necesario realizar cambios sobre la estructura edilicia y la gestión de las aberturas de la Biblioteca Central para optimizar su CT y reducir el consumo energético de climatización. Una propuesta se ofrece a continuación.

✱ *Reducción de la radiación solar que incide sobre la envolvente en verano*

- La intensa radiación solar típica durante los veranos en la región eleva la temperatura superficial de la terraza y por ende la cantidad de calor transmitido al interior (Figura 6-9). Si bien

ésta cuenta con una membrana geo-textil que refleja buena parte de la radiación incidente, el flujo de calor entrante a través de esta parte de la envolvente podría reducirse disponiendo de un aislante natural como, por ejemplo, una cubierta vegetal que reduciría el exceso de temperatura superficial detectado a la vez que aumentaría la aislación térmica.

- El intenso intercambio de calor a través de las paredes verticales de la envolvente se debe a la absorción diurna de la radiación solar, a su almacenamiento en la masa térmica del ladrillo visto, y a la continua emisión de radiación IR. Para mejorar este aspecto, deberían cambiarse los coeficientes de absorbanza y emitancia de la superficie disponiendo una cubierta vegetal (en la forma de “jardines colgantes”) o “fachada verde”, plantando árboles y/o arbustos de hojas caducas en la inmediata vecindad de las paredes o usando una pintura adecuada. Este tipo de cubierta mejoraría no solo la respuesta térmica al problema planteado sino que ofrecería también una buena perspectiva visual, disminuyendo el calor emitido por la envolvente en verano y mitigando la desagradable sensación térmica que produce en las personas que se encuentren en el exterior inmediato. Además, el uso de cubiertas verdes contribuye a la preservación ambiental capturando CO₂ de la atmosfera, a humedecer el aire circundante, y a reducir la contaminación química y sonora.

- La radiación solar ingresa al edificio a través de una vasta cantidad de superficies vidriadas guarecidas parcialmente por aleros en las fachadas, lo cual reduce el ingreso de la radiación solar directa durante las horas próximas al mediodía estival. Sin embargo, la irradiancia total durante el resto del día, y la radiación difusa y la reflejada por las superficies (albedo) al mediodía pueden ser intensas, aumentando T_i y produciendo deslumbramientos. La radiación es absorbida por los diferentes objetos internos que la re-emiten en forma de radiación IR y, como el coeficiente de transmisión de esta última es muy baja para el vidrio, la energía radiativa ingresada queda atrapada causando el efecto invernadero. Las cortinas de tela, venecianas y de paños verticales dispuestas en los ambientes internos reducen el deslumbramiento pero igualmente atrapan la energía radiante del exterior y la liberan en el interior. De aquí que se recomienda fuertemente la colocación de persianas o de parasoles opacos en el exterior de las puertas y ventanas vidriadas para evitar el ingreso de la radiación solar.

✳ *Aumento de la ventilación natural nocturna en verano*

Para alcanzar las condiciones del CT se requiere una importante ventilación natural por diferencia de temperatura y/o cruzada en verano, evitando así recurrir a equipos mecánicos que implican un elevado consumo energético (probablemente inviable) debido al gran volumen a refrescar. Como se mencionó en §2.5, con una temperatura mínima media de 15°C típica en Tandil (Figura 3-1), se puede refrescar el interior de la Biblioteca Central durante las noches liberando el calor acumulado durante el día, aprovechando que T_e baja considerablemente durante la mayoría de las noches estivales. A fin de no depender del viento, lo ideal es recurrir a la ventilación natural por

diferencia de temperatura (Figura 2-2c). Para ello, el edificio debería contar con una abertura significativa a nivel del techo y tendrían que abrirse todos los ventiletes de la PB. Puesto que la diferencia de altura entre aberturas dispuestas en diferentes niveles (por ejemplo, PB y PA) genera una diferencia importante de presión en el interior que impulsa la renovación del aire, podría producirse un caudal importante del mismo. El análisis realizado para el verano 2016-2017 (§6.4) confirman que podrían colocarse aberturas en la lucarna o bien instalarse ventiletes en las aberturas ya existentes en PA. De acuerdo a los resultados de las simulaciones, con una abertura superior equivalente al área de la lucarna (25 m^2) y los ventiletes ya dispuestos en PB, T_i desciende unos 5°C con respecto a la temperatura que actualmente se alcanza en el atrio central. Considerando que las temperaturas medias medidas en el interior alcanzan 29°C durante el estío, una ventilación nocturna incluso menor a la simulada permitiría que las condiciones interiores se acerquen bastante a las de la zona de CT (Figura 6-15). El cierre durante el día y la apertura durante la noche de las aberturas podría gestionarse apropiadamente con el uso de sensores de temperatura y sistemas de automatización. Esta estrategia de implementación de la ventilación natural por diferencia de temperatura complementaría las acciones mencionadas en los puntos anteriores.

✳ *Aumento de la aislación térmica de la envolvente*

En invierno, la temperatura media externa baja considerablemente y las pérdidas de calor deben compensarse con una cantidad de energía proporcionada por equipos mecánicos de calefacción inversamente proporcional a la calidad de la aislación de la envolvente. Para esta situación, la disposición de una cubierta verde en la terraza también disminuiría las pérdidas de calor por conducción a través del techo. Como la mayor pérdida de calor se produce a través de las superficies vidriadas, debe aumentarse la aislación de estas superficies para reducir el consumo de energía en invierno. Esta solución implica colocar cortinas de PVC/madera o postigones que puedan cerrarse durante las noches conservando el calor interior ganado durante el día. La pérdida de calor a través de la lucarna (Fig. 6-15) puede reducirse aumentando la aislación, por ejemplo, cambiando los vidrios actuales por DVH, y/o agregando un cielo raso traslucido en la parte inferior del ventanal.

✳ *Aprovechamiento de la energía solar en la terraza*

Por último, no puede soslayarse que la terraza de la Biblioteca Central es un gran espacio libre que recibe una enorme cantidad de energía solar durante todo el año la cual no sólo se desperdicia sino que en general actúa en forma negativa en el logro del CT de los usuarios. Actualmente, existe la tecnología para aprovechar dicha energía instalando allí paneles solares que alimenten los equipos mecánicos de calefacción en invierno y de refrescamiento en verano (e.g. equipos solares de enfriamiento y sistema de cielorraso enfriado). Aunque no se logre generar toda la energía necesaria para cubrir las necesidades del edificio, su implementación se justificaría económicamente.

8. CONCLUSIONES

La investigación que conforma esta tesis atañe a la caracterización del comportamiento térmico de la Biblioteca Central de la UNCPBA basado en el monitoreo térmico que se viene realizando casi desde su inauguración. Este edificio fue construido bajo los estándares técnicos recomendados para la región geográfica de pertenencia y presenta un estilo constructivo representativo. Su geometría y características de uso imponen desafíos al diseño arquitectónico y gestión de las estrategias para mantener el confort interior. Los resultados de la evaluación de los sistemas constructivos empleados y sus componentes permiten ofrecer mejoras específicas que pueden extrapolarse a otros casos. Entendiendo que la comprensión acabada de los mecanismos de transferencia de calor a través de la envolvente edilicia y la selección de los materiales que la componen contribuyen a lograr el confort térmico interior con bajo costo energético, se espera contribuir al impulso de la construcción ambientalmente consciente en la ciudad de Tandil en particular y del centro bonaerense en general.

La descripción del comportamiento térmico de un edificio se logra integrando la contribución de cada proceso de transmisión del calor (conducción, convección, radiación) para las diversas componentes de la envolvente (muros, aberturas, techos, piso, etc.) y la energía acumulada en las paredes y el interior de la edificación, considerando que los flujos de calor asociados con cada mecanismo de transferencia no son independientes. Actualmente los diseñadores y constructores argentinos cuentan con una cantidad de normas técnicas (IRAM y otras) que establecen los valores de los parámetros característicos de los materiales de construcción y la forma de estimar el flujo de calor a través de la envolvente para las diversas zonas bio-climáticas. A fin de simplificar los cálculos asociados con la transferencia de calor, se emplean aproximaciones como, por ejemplo, la conducción térmica unidimensional estacionaria a través de la envolvente en condiciones climáticas promedio. Como consecuencia, las normas resultan adecuadas sólo para proyectar las obras y, eventualmente, para determinar la categoría de eficiencia de la aislación establecida entre los niveles A y H (IRAM 11900). En esta tesis, esta aproximación fue empleada para calcular las resistencias superficiales de los muros perimetrales, las pérdidas de calor en invierno y el tiempo de repuesta del edificio.

Es posible realizar un paso adicional estableciendo el balance térmico no estacionario con condiciones climáticas promedio por medio de programas específicos de simulación. Para ello es necesario contar con la descripción digital detallada del edificio y con los valores de todos los parámetros edilicios involucrados. El comportamiento térmico se determina resolviendo las ecuaciones diferenciales y/o integrales que rigen los procesos de transferencia de calor con las CI y CC adecuadas. En este trabajo también se simuló el balance térmico global pero con las condiciones meteorológicas medidas durante el transcurso de un año. Así, se reportan los primeros resultados de

la simulación del comportamiento térmico de la Biblioteca Central, los que dan una idea de las dificultades y posibilidades que ofrecen los programas como *EnergyPlus*. Se analizó en detalle el balance térmico durante los recesos estival e invernal, la potencia de calefacción necesaria para mantener el atrio central en la zona de confort en invierno, y los posibles cambios a la envolvente para mejorar la ventilación natural. Estos cálculos requieren definir múltiples parámetros que necesitan validaciones específicas. Si bien esta tarea conlleva un esfuerzo importante, los programas de simulación son herramientas ventajosas para determinar el balance térmico total del edificio o el parcial de cada componente de la envolvente, y también para analizar situaciones virtuales que son difíciles o costosas de estudiar de otra manera.

Tanto en las estrategias y cálculos recomendados por las normas técnicas como en las simulaciones numéricas, se observa que los fundamentos físicos subyacentes y las aproximaciones realizadas se presentan dispersos y con vacíos sustanciales que dificultan su acabada comprensión. Otra dificultad se encuentra en la matemática usada para resolver la ecuación del calor dependiente del tiempo para cada componente constructiva de la envolvente con las CC apropiadas. Por lo tanto, nuestro principal aporte es haber desarrollado metodologías prácticas y novedosas que asocian el flujo de calor y la respuesta dinámica de la envolvente a variaciones de T_e , para evaluar el comportamiento térmico global de una edificación en condiciones reales de uso, empleando herramientas y principios físico-matemáticos, y para explorar la factibilidad de aplicación de la TTIR.

Los diversos modelos analíticos implementados ofrecieron la oportunidad de conocer los detalles de los procesos y los factores que dan cuenta de las pérdidas o ganancias de calor en el edificio evaluado y resaltar la importancia que debe prestarse a cada uno de ellos. Igualmente significativa resulta la medición de la transmitancia de cada sector constructivo que compone la envolvente en condiciones reales de funcionamiento a fin de chequear el valor estimado en la etapa de diseño y/o detectar fallas de construcción u otros factores no tenidos en cuenta y que no siempre son evidentes.

El método de la admitancia, comúnmente usado en el análisis de circuitos eléctricos, se aplicó para hallar la respuesta térmica dinámica a una variación periódica de T_e . En el caso de la transmisión del calor a través de muros, una matriz de transmisión relaciona las temperaturas y los flujos de calor en las superficies externa e interna en función del espesor del muro y la conductividad, densidad y calor específico de los materiales empleados. Los resultados permitieron destacar la importancia de seleccionar la combinación y proporción adecuadas de los materiales no sólo basándonos en la conductividad térmica. El método se aplicó, por primera vez en nuestro país, al cálculo y análisis de los factores dinámicos de respuesta a variaciones de T_e para los muros de la Biblioteca Central y de otros casos típicos de Argentina y México. Posteriormente estudiamos la forma de integrar el método de la admitancia con el de la conducción estacionaria del calor, implementando una metodología para cuantificar el flujo de calor variable a partir de mediciones termográficas,

encontrando que los efectos de las variaciones diurnas de temperatura predominan en verano, mientras que aquellos de la temperatura media externa lo hacen en invierno.

La respuesta dinámica de los muros también se determinó resolviendo numéricamente la ecuación del calor unidimensional para medios in-homogéneos. Los resultados obtenidos, como los del método de la admitancia, mejoran la comprensión de la respuesta dinámica de las diferentes capas de material que componen un muro y su contribución al comportamiento térmico global del mismo, especialmente para cuantificar los efectos de la variación diurna de T_e sobre las diferentes capas. Se encontró que los muros perimetrales dobles con aislante interior obtienen una menor transferencia térmica dinámica y un mayor tiempo de retraso comparados con los muros de ladrillo hueco frecuentemente usados en las construcciones tandilenses. En consecuencia, los muros dobles ofrecen la mejor opción para resguardar el interior edilicio de las variaciones diurnas de temperatura, y preservar por más tiempo las condiciones internas. Esto implica un menor requerimiento energético para mantener las condiciones de confort térmico en el interior de la Biblioteca Central. Por otra parte, el problema tratado constituye una interesante aplicación de la solución de la ecuación del flujo de calor a través de medios in-homogéneos, con CC que involucran capas límites de aire adyacentes a contornos rígidos, y de cómo obtener información física relevante de los procesos relacionados con la conducción del calor a través de interfaces térmicas.

Por su parte, aplicando la TTIR se midieron T_{se} y T_{si} de los distintos componentes constructivos de la envolvente, varias veces al día y en todas las estaciones del año, mediciones difíciles de realizar de otro modo. Esas temperaturas, junto con T_e y T_i medidas en forma independiente, hicieron posible implementar una metodología novedosa para calcular las resistencias térmicas superficiales y obtener valores representativos del flujo de calor por conducción a través de las superficies planas verticales de la envolvente. Consecuentemente, las pérdidas de calor por conducción a través de la misma fueron cuantificadas en forma independiente de los parámetros de diseño. Igualmente novedosa es la implementación de otra metodología que permite obtener teóricamente la T_{se} de los muros en cualquier momento del día y en cualquier estación del año, para lo cual se requiere conocer la evolución de T_e , I_t incidente sobre la pared y R_{se} . La irradiancia directa, la difusa y la reflejada por el piso fueron calculadas por medio de modelos puramente teóricos y a partir de mediciones realizadas en estaciones meteorológicas. Los resultados se compararon satisfactoriamente con mediciones termográficas, poniendo en evidencia la gran cantidad de calor absorbida y posteriormente liberada por los muros expuestos a la radiación solar, la cual contribuye a la formación de las islas urbanas de calor. El número de mediciones realizadas en diferentes horas, días y estaciones compensan las fluctuaciones estadísticas, dando lugar a una razonable correlación entre la teoría y las mediciones *in situ*. Así, los efectos de la radiación solar sobre la transferencia de calor a través de la envolvente pueden ser considerados, mientras los parámetros relacionados con el cálculo de $T_{sol-aire}$ pueden ser experimentalmente validados en el sitio

específico de construcción. Esta metodología se extendió al análisis del enfriamiento radiativo nocturno de los muros, aunque también puede aplicarse a la evaluación térmica de paredes con exposición parcial a la radiación solar (e.g. paredes con parasoles o vegetación circundante).

Los avances descritos hasta aquí involucran la resolución del *problema directo*, es decir, aquel planteado cuando se conocen las ecuaciones y todos los parámetros involucrados en los procesos físicos intervinientes. Pero también se exploró un enfoque novedoso para el análisis térmico de las construcciones que introduce la resolución del *problema inverso*. Este procedimiento es especialmente útil cuando se debe determinar el comportamiento térmico global de edificaciones disponiendo de pocos datos para lograr una buena estimación de la masa térmica interna, y para validar los valores de los parámetros físicos involucrados en los diferentes procesos de transmisión del calor a través de la envolvente. De este modo, se correlacionó matemática y simultáneamente T_i con todas las variables relevantes disponibles (e.g. datos registrados por las estaciones meteorológicas y las mediciones *in-situ*). También se calcularon las contribuciones de los diferentes mecanismos de intercambio de calor con el exterior, distinguiendo el comportamiento en PB y PA para condiciones reales de funcionamiento. La aplicación de este procedimiento para evaluar térmicamente una construcción ya existente resulta más eficiente que el método directo. Se basa en mediciones sencillas durante periodos establecidos por el usuario, requiere menos cálculos y no tiene coeficientes de ajuste lo cual disminuye la incerteza de los resultados. Además, resulta ventajoso para guiar a arquitectos y constructores en la introducción de mejoras de las condiciones higro-térmicas internas, y para comparar los valores de los parámetros edilicios con los de diseño.

En resumen, una buena cantidad de cálculos, mediciones, aproximaciones, modelos y simulaciones fueron integrados para describir el comportamiento térmico global y parcializado de un edificio complejo, diseñado de acuerdo a los estándares recomendados por las normas técnicas para el centro bonaerense. Los hallazgos servirán de punto de partida para elaborar nuevas estrategias constructivas proclives a controlar las pérdidas y ganancias de calor, profundizar la comprensión del movimiento de aire interno para optimizar el empleo de la ventilación natural, e implementar el uso de sistemas pasivos de calefacción y refrescamiento. Todo lo cual contribuirá a una notable disminución del consumo de la energía destinada a la gestión de las condiciones óptimas de climatización.

Trabajos pendientes

❖ Los resultados reportados muestran que R_{se} depende de la irradiancia solar y del flujo de calor a través de la capa límite de aire externa de la envolvente. Por lo tanto, R_{se} puede correlacionarse con los cambios en la intensidad y dirección del viento, las diferentes componentes de la irradiancia solar, la diferencia $(T_{se}-T_e)$, la turbulencia atmosférica, la humedad del aire, etc. Para

abordar esta temática, se cuenta con modelos físicos de capa límite que son frecuentemente usados en otras ramas de la física y la ingeniería, y herramientas estadísticas. Por su complejidad, este tipo de análisis formará parte de un trabajo futuro.

❖ Se analizó el comportamiento dinámico de los muros y superficies vidriadas aplicando el método de la admitancia. En principio, los resultados de las diferentes partes de la envolvente de la Biblioteca Central podrían integrarse superponiendo soluciones. El análisis también podría considerar las diferentes armónicas de las variaciones de T_e y los efectos de la radiación solar.

❖ La investigación presentada en esta tesis se focalizó en la transferencia de calor por conducción y, en menor medida, por radiación al interior de una edificación. Los resultados de todos los análisis particulares efectuados coinciden en la existencia de una escasa ventilación natural en la presente configuración del edificio. Un estudio detallado de la ventilación natural que puede generarse en el edificio en verano incorporando ventiletes a nivel del techo es necesario y para ello pueden emplearse tanto los códigos de simulación como los modelos físicos. El GFGA dispone de un modelo físico de la Biblioteca Central (1:67 escala horizontal, 1:30 escala vertical) en acrílico transparente cortado con láser, con detalles de su estructura interna que reproduce la distribución de las oficinas y contiene todas las aberturas que pueden abrirse. Los experimentos de laboratorio permitirán determinar la estructura de los flujos internos de aire que pueden relacionarse con los resultados del modelado numérico permitiendo formular estrategias para el óptimo aprovechamiento de la ventilación natural, y evaluar el empleo de técnicas de enfriamiento y/o calentamiento alternativas adecuadas al clima local (abertura de la lucarna, uso de parasoles externos, plantación de árboles y arbustos cerca de las fachadas orientadas al N y E, instalación de cielorraso corredizo, etc.).

❖ Los resultados presentados son válidos para el edificio elegido como caso de estudio y bajo las condiciones de medición reportadas. Ellos muestran la importancia de cuantificar el intercambio de calor con el exterior para edificaciones pre-existentes y en su lugar de emplazamiento. Ahora, sigue el análisis de otros casos de estudio y la comparación de los resultados obtenidos con los modelos y herramientas matemáticas empleadas aquí. Posteriormente el estudio podría ampliarse y generalizarse a determinadas zonas urbanas y suburbanas de interés conformadas por diferentes tipos de construcción.

❖ El análisis del comportamiento térmico de las construcciones en las situaciones de “peor caso” (e.g., la ocurrencia de olas de calor en verano y olas de frío en invierno) también es un tema que merece profundizarse. De acuerdo con el SMN, un evento de ola de calor en Tandil se define cuando las temperaturas máximas y mínimas superan o igualan 30.6 y 16.8°C respectivamente, durante por lo menos 3 días consecutivos. Por su parte, las temperaturas máxima y mínima en una ola de frío son inferiores o iguales a 9.8 y -1.9°C respectivamente. En el período 1961-2010, se

registraron 17 olas de calor y 23 olas de frío de hasta 6-7 días de duración, aunque en los últimos años hay una tendencia a aumentar la ocurrencia de estos eventos y a intensificar su amplitud térmica y duración probablemente debido al calentamiento planetario global. Además, las olas de calor suelen coincidir con periodos de alta irradiancia solar, baja humedad relativa, viento calmo, altísima sensación térmica e insignificante probabilidad de implementar una ventilación cruzada. Por el contrario, las olas de frío pueden coincidir con la ocurrencia de vientos fuertes y alta humedad relativa que baja la sensación térmica. Estos eventos tienen un efecto muy negativo en grupos de riesgo de la población y producen un exceso de demanda de energía que no siempre puede sostenerse adecuadamente, empeorando la situación general. Por lo tanto, es conveniente adecuar las construcciones también para mitigar en forma pasiva los efectos de estas olas de calor y de frío, y evitar aquellos tipos de construcción que pueden incluso intensificar sus efectos negativos.

❖ La recomendación encontrada en las normas vigentes en cuanto al cálculo del flujo de calor en el régimen estacionario presenta una notoria limitación cuando se aplica al tipo de muros que actualmente se construyen en la zona. Por lo tanto, sería ventajoso incluir adicionalmente la descripción de los flujos de calor en régimen no estacionario en la etapa de diseño. El uso del método de la admitancia puede proveer parámetros útiles del comportamiento dinámico, aunque es necesario calcular el comportamiento dinámico de cada uno de los componentes de la envolvente e integrarlos adecuadamente en el edificio completo. Es posible desarrollar aproximaciones sencillas que puedan emplearse fácilmente y sin mucho conocimiento de física y matemática, y difundirlos en los ámbitos de la construcción a nivel local y/o regional.

❖ De igual forma, podrían desarrollarse modelos numéricos sencillos ajustados a las características meteorológicas de Tandil y/o de las diferentes zonas bioclimáticas argentinas, para cuantificar el efecto de la radiación solar sobre la envolvente, y promover la realización de pruebas no invasivas para la caracterización térmica (e.g. TTIR) para establecer los valores reales de R_{se} y R_{sj} .

❖ El montaje necesario para activar la ventilación natural nocturna en verano y el aprovechamiento de la energía solar en la terraza de la Biblioteca Central (§7.4) constituyen desafíos teóricos y prácticos interesantes. Estos incluyen la instalación y puesta en marcha de actuadores para la apertura automática de las aberturas a nivel del techo y de paneles solares, los cuales deben integrarse a las instalaciones existentes en forma racional y armónica, optimizando la utilización del recurso solar a la vez que se disminuye lo más posible el consumo energético. No menos importante son el monitoreo de las condiciones térmicas del interior y la actualización y/o desarrollo de los modelos teóricos que contemplen los cambios generados en el comportamiento térmico edilicio.



REFERENCIAS

- Albatici R, Tonelli AM (2010) *Infrared thermovision technique for the assessment of thermal transmittance value of opaque building elements on site*. Energy and Buildings 42, 2177-2183.
- Alías H, Jacobo G, Martina P, Corace J (2013) *Aplicación cualitativa de la termografía en el diagnostico higrotérmico edilicio: Caso de la sede de la Facultad de Arquitectura de la UNNE*. Proceedings of XXXVI Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente 1, 05.105-114.
- Al-Sanea S (2003) *Finite-volume thermal analysis of building roofs under two-dimensional periodic conditions*. Building and Environment 38 (8), 1039-49.
- Aoki T, Mizutani A (2015) *Measurement of the vertical distribution of reflected solar radiation*. Journal of Engineering and Technological Sciences 47 (2), 160-169.
- Asan H, Sancaktar Y (1997) *Effects of Wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor*. Energy and Buildings 28, 159-166.
- ASHRAE (1997) ASHRAE Handbook - Heating, ventilating, and air-conditioning applications, SI Edition, Atlanta, GA, EEUU.
- ASHRAE (2009) ASHRAE Handbook – Fundamentals. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc.
- Aste N, Angelotti A, Buzzetti M (2009) *The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings*. Energy and Buildings 41, 1181–1187.
- ASTM C1153-97 (2003) *Standard practice for location of wet insulation in roofing systems using infrared imaging*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003, www.astm.org
- ASTM C1060-11a (2011) *Standard practice for thermographic inspection of insulation installations in envelope cavities of frame buildings*. ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org
- ASTM C1046-95 (2013), *Standard practice for in-situ measurement of heat flux and temperature on building envelope components*. ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org
- ATECYR - Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (2008) *Guía técnica: Procedimientos y aspectos de la simulación de instalaciones térmicas en edificios*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Madrid.
- Avdelidis NP, Moropoulou A (2004) *Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures*. Journal of Cultural Heritage 5, 119–127.
- Awbi HB, Hatton A (1999) *Natural convection from heated room surfaces*. Energy and buildings 30 (3), 233-244
- Balaras C, Argirou A (2002) *Infrared thermography for building diagnostics*. Energy and Buildings 34, 171–183.

- Baehr HD, Stephan K (2006) *Heat and Mass Transfer*. 2^{da} Edición. Springer-Verlag, Berlin.
- Barnaby CS, Wright JL, Collins MR (2009) *Improving Load Calculations for Fenestration with Shading Devices*. ASHRAE Transactions 115 (2), 31-44. RP-1311. UWSpace. <http://hdl.handle.net/10012/11548>
- Barrios G, Huelsz G, Rojas J (2012) *Thermal performance of envelope wall/roofs of intermittent air-conditioned rooms*. Applied Thermal Engineering 40, 1-7.
- Barrios G, Huelsz G y Rojas J (2014) *Ener-Habitat: A cloud computing numerical tool to evaluate the thermal performance of walls/roofs*. Energy Procedia 57, 2042–2051. Disponible en: <http://www.enerhabitat.unam.mx/>
- Berger X, Buriot D, & Garnier F (1984) *About the equivalent radiative temperature for clear skies*. Solar Energy 32 (6), 725-733.
- Berthou T, Stabat P, Salvazet R, Marchio D (2014) *Development and validation of a gray box model to predict thermal behavior of occupied office buildings*. Energy and Buildings 74, 91-100.
- Blasco Lucas IA (2008) *Aportes de la arquitectura sustentable en el sector residencial sobre el balance energético-ambiental argentino*. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 12, 07.17-24.
- Blender, M (2015) *El confort térmico*. Arquitectura y Energía, Portal de eficiencia energética y sostenibilidad en arquitectura y edificación. <http://www.arquitecturayenergia.cl/home/el-confort-termico/>
- Bohlin TP (2006) *Practical grey-box process identification: theory and applications*. Springer, Londres.
- Braun JE, Chaturvedi N (2002) *An inverse gray-box model for transient building load prediction*. HVAC&R Research 8 (1), 73-99.
- Chrysochoos A, Berthel B, Latourte F (2008) *Local energy analysis of high-cycle fatigue using digital image correlation and infrared thermography*. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design 43 (6), 411–421.
- CIBSE (1986) *Guide Book A*. Chartered Institution of Building Service Engineers, Londres.
- Chauvie V (2004) *Estudio de programas de simulación térmica de edificios para el clima de la ciudad de Montevideo: SIMEDIF, ARQUITROP y SETI*. Avances en energías Renovables y Medio Ambiente 8 (1), 05.115–120.
- Chen C, Krokosky E (1976) *Steady and non-steady solar heat transmission through roofs*. Materiaux et Constructions 9 (1), 19-32.
- Chew MYL (1998) *Assessing building façades using infra-red thermography*. Structural Survey 16 (2), 81-86.
- CIBSE (2006) *Guide A: Environmental design*, Chartered Institution of Building Services Engineers, p. 102, Londres.

- CiBSE (2001) *Guide C: Reference data*, Chartered Institution of Building Services Engineers, Cap, 3: *Heat transfer* Oxford.
- Clark G (1981) *Passive/hybrid comfort cooling by thermal radiation*. Passive Cooling: American Section of the International Solar Energy Society, Miami Beach.
- Clark MR, McCann DM, Forde MC (2003) *Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges*. NDT&E International 36, 265–275.
- Crawley DB, Lawrie LK, Winkelmann FC, Buhl WF, Huang YJ, Pedersen CO, ..., Glazer J (2001) *EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program*. Energy and Buildings 33 (4), 319-331.
- Czajkowski JD (2015) *Atlas Bioclimático de Argentina, basado en datos de Servicio Meteorológico Nacional de Argentina*. <http://www.arquinstal.com.ar/atlas.html>.
- Czajkowski JD, Rosenfel E (1992) Regionalización bioclimática de la provincia de Buenos Aires. Actas XV Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energía Solar, San Fernando del Valle de Catamarca.
- Czajkowski JD, Gómez AF (1994) *Introducción al diseño bioclimático y la economía energética edilicia*. Editorial Universidad Nacional de La Plata, Colección Cátedra, La Plata, Argentina.
- Dascalaki E, Santamouris M (1996) *Natural ventilation*. En: *Passive Cooling of Buildings*, ed M. Santamouris, D. Asimakopoulis, pp. 220-306. James & James, Londres.
- Davis MG (1994) *The Thermal Response of an Enclosure to Periodic Excitation: The CIBSE Approach* Building and Environment 29 (2), 217-235.
- Davis MG (1995) *Solutions to Fourier's equation and unsteady heat flow through structures*. Building and Environment 30 (3), 309–321.
- Davies MG (2004a) *Building Heat Transfer*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, Inglaterra.
- Davies MG (2004b) *Wall thermal capacity and transfer coefficients*. Building and Environment 39 (1), 109-112.
- De Paul I (2006) *Medidas del coeficiente H del viento sobre una vivienda*. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 10, 03.21-28.
- Defraeye T, Blocken B, Carmeliet J (2011) *Convective heat transfer coefficients for exterior building surfaces: Existing correlations and CFD modelling*. Energy Conversion and Management 52 (1), 512-522.
- DeKay M, Brown GZ (2013) *Sun, Wind, and Light: Architectural Design Strategies*. 3rd Ed. John Wiley & Sons Lt., Chichester.
- Denegri MJ, Raichijk C, Gallegos HG (2012) *Evaluación de diferentes modelos utilizados para la estimación de la radiación fotosintéticamente activa en planos inclinados*. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 16, 11.9-15.

- Di Bernardo A, Filippín C, Pipa D (2011) *Desempeño térmico-energético de un prototipo demostrativo de vivienda de interés social en Córdoba, Argentina*. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 15, 08.35-42.
- Díaz VS, Barreneche RO (2005) *Acondicionamiento térmico de edificios*. 1st Ed, Nobuko, Buenos Aires.
- Duffie JA, Beckman WA (1991) *Solar Engineering of Thermal Processes*. 2^{da} Ed, Wiley-Interscience, Nueva York.
- Evangelisti L, Guattari C, Gori P, Bianchi F (2017) *Heat transfer study of external convective and radiative coefficients for building applications*. Energy and Buildings 151, 429-438.
- Falconer DR, Sowell EF (1993) *Electronic tables for the ASHRAE load calculation manual*. ASHRAE Transactions 99, 193-200.
- Fernández Díez P (1992) *Ingeniería Térmica y de Fluidos*. Universidad de Cantabria. Santander, España.
- Flores Larsen S, Lesino G (2001) *Modelo térmico del programa SIMEDIF de simulación de edificios*. Energías Renovables y Medio Ambiente 9, 15 – 24.
- Flores Larsen S, Hongn M (2012) *Termografía infrarroja en la edificación: Aplicaciones cualitativas*. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 16, 08.25-32.
- Garzón B, Mendonca C (2012) *Monitoreo y simulación térmica de dos viviendas sociales unifamiliares bajo condiciones reales de uso en la localidad de Colalao del Valle, Tucumán*. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 16, 05.39-44.
- Gasparella A, Pernigotto G, Baratieri M, Baggio P (2011) *Thermal dynamic transfer properties of the opaque envelope: Analytical and numerical tools for the assessment of the response to summer outdoor conditions*. Energy and Buildings 43 (9), 2509-2517.
- Givoni B (1969) *Man, Climate and Architecture*. Elsevier Publishing Company Limited, Inglaterra.
- Goldstein RJ (1978) *Application of aerial infrared thermography to the measurement of building heat loss*. ASHRAE Transactions 84, 207-226.
- Gonzalo GE (1998) *Manual de Arquitectura Bioclimática*. Editorial Arte-Color, Tucumán.
- Gottlieb D, Orzag S (1977) *Numerical Analysis of Spectral Methods: Theory and Applications*, SIAM, Philadelphia, PA.
- Grinzato E, Bison PG, Cesini G, Ricci R (1990) *Quality control of cold store assembling by IR thermography and numerical simulation*. I.I.F. Commission B2, C2, D1, D2, D3. Dresden, Germany, 743-748.
- Grinzato E, Vavilov V, Kauppinen T (1998) *Quantitative infrared thermography in buildings*. Energy and Buildings 29, 1-9.
- Grysa K (2011) *Inverse Heat Conduction Problems*, En: *Heat Conduction - Basic Research*. Pp. 1-36. Prof. V. Vikhrenko Ed., InTech, Croacia.

- Hazewinkel M (2001) *Parabolic partial differential equation, numerical methods*. Encyclopaedia of Mathematics, Springer.
- Huelsz G, Barrios G, Rojas J (2014) Differences on results from steady-state and time-dependent wall/roof heat transfer models in Mexican climates. *Energy Procedia* 57, 1825–1833.
- INTI – Instituto Nacional de Tecnología Industrial (2005) *Ahorro y certificación energética: la envolvente de los edificios. “Saber cómo”*. Nº 27, pp. 4. <http://www.inti.gob.ar/sabercomo/sc27/inti5.php>.
- Iordache V, Iordache F (2006) *Energy performance of the building. Factors analysis*. Buletinul Stiintific XLIX, Nº 2, 66–75.
- IRAM 11603 (2011) *Acondicionamiento térmico de edificios: Clasificación bioambiental de la República Argentina*, Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires. www.iram.org.ar
- IVBA - Instituto de la Vivienda de la Provincia de Buenos Aires (2014) *Normas Técnicas para Proyectos de Conjuntos Habitacionales. Cap. 4: Acondicionamiento higrotérmico de edificios.* www.vivienda.mosp.gba.gov.ar.
- Kapsalis VC, Vardoulakis E, Karamanis D (2014) *Simulation of the cooling effect of the roof added photovoltaics*. *Advances in Building Energy Research* 8 (1), 41-54.
- Karmele UM, Davies MG (2008) *One-dimensional solutions to Fourier’s equation and measurements of heat transmission through walls: The role of wall decay times*. *Building and Environment* 43, 1433-1445.
- Keyserling JR, Ahlgren PD, Yu E, Belliveau N, Yassa M (2000) *Functional infrared imaging of the breast–historical perspectives, current applications and future considerations*. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine* 19 (3), 33–41.
- Kontoleon K, Bikas D (2007) *The effect of south wall's outdoor absorption coefficient on time lag, decrement factor and temperature variations*. *Energy and Buildings* 39 (9), 1011-1018.
- Kramer RP, van Schijndeln AWM, Schellen HL (2012) *Simplified thermal and hygric building models: A literature review*. *Frontiers of Architectural Research* 1, 318–325.
- Kramer RP, van Schijndeln AWM, Schellen HL (2013) *Inverse modeling of simplified hygrothermal building models to predict and characterize indoor climates*. *Building and Environment* 68, 87–99.
- Kukadia V (1997) *Air quality in buildings in urban areas*. Building Research Establishment Seminar Paper, Garston, RU.
- Kumar R, Kaushik SC (2005) *Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings*. *Building and Environment* 40 (11), 1505-1511.

- Lanzetti A (2014) *Manual de Aplicación Ley 13059: Acondicionamiento higrotérmico de edificios. Instituto de la Vivienda de la Provincia de Buenos Aires.*
http://www.vivienda.mosp.gba.gov.ar/varios/manual_ac_higrotermico.pdf.
- Laxen D, Noordally E (1987) *NO₂ distribution in street canyons*. Atmospheric Environment 21 (9), 1899-1903.
- Leed - Leadership in Energy and Environmental Design (2018) U.S. Green Building Council,
<http://leed.usgbc.org/leed.html>
- Ledesma SL, Gonzalo GE, Cisterna MS, Márquez Vega SG, Quiñones GI, Nota VM (2004) *Evaluación comparativa de eficiencia de parasoles y su incidencia en la iluminación natural de aulas en San Miguel de Tucumán*. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 8, 05.55-60.
- Li XQ, Chen YM, Spitler JD, Fisher D (2009) *Applicability of calculation methods for conduction transfer function of building constructions*. International Journal of Thermal Sciences 48, 1441-1451.
- Lienhard IV JH, Lienhard V JH (2011) *A Heat Transfer Textbook*. 4^{ta} Edición, Phlogiston Press Cambridge, Massachusetts.
- Linden PF (1999) *The fluids mechanics of natural ventilation*, Annual Review of Fluid Mechanics 31, 201-38.
- Lindquist TM, Bertling L (2008) *Hazard rate estimation of high-voltage contacts using infrared thermography*. Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium, Las Vegas, NV, USA, 233–239. <http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/RAMS.2008.4925800>
- Liu BYH, Jordan RC (1960) *The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation*. Solar Energy 4 (3), 1-19.
- Mack RT (1985) *Energy loss profiles: foundation for future profit in thermal imager sales and service*. Proceedings 5th Infrared Information Exchange, New Orleans, USA, pp. 15-24.
- Marino B.M., L.P. Thomas (2006) *Modelado en el laboratorio de los flujos de ventilación natural usando criterios de similaridad dinámica*. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (AVERMA) 10, 05.139-146.
- Marino B.M., Thomas L.P. (2007c) *Modelado en el laboratorio de la ventilación natural generada por diferencia de temperatura entre el exterior y el interior en una vivienda*. AVERMA 11, 08.43-50.
- Marino B.M., Thomas L.P., Linden P.F. (2008) *Buoyancy-driven flow between two rooms coupled by two openings at different levels*. J. Fluid Mech. 594, 425-443.
- Marino B.M., Thomas L.P., Tovar R., Castillo J.A. (2011) *Flow generated by a thermal plume in a cooled-ceiling system*. Energy and Buildings 43, 2727-2736.
- Marino B.M., Muñoz N., Thomas L.P. (2016) *Estimation of the surface thermal resistances and heat loss by conduction using thermography*. Applied Thermal Engineering 114, 1213-1221.

- Marino B.M., Thomas L.P., Muñoz N. (2018) *Calculation of the external surface temperature of a multi-layer wall considering solar radiation effects*. Energy and Buildings 174, 452-463.
- Martín S, Cañas I, González I (2004) *Thermographic survey of two rural buildings in Spain*. Energy and Buildings 34, 515-523.
- McCafferty DJ (2007) *The value of infrared thermography for research on mammals: previous applications and future directions*. Mammal Review 37 (3), 207-223.
- McMullan P (1990) *Assessing structural components of new masonry construction utilizing infrared thermography*. Thermosense XII: An International Conference on Thermal Sensing and Imaging Diagnostic Applications, Orlando (Florida, EEUU). Proc SPIE 1313, 78. doi: 10.1117/12.21913
- Melgosa Revillas S (2011) *Guía de la termografía infrarroja. Aplicaciones en ahorro y eficiencia energética*. Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. <http://www.fenercom.com/pages/publicaciones/publicacion.php?id=168>.
- Muñoz N., Marino B.M., Thomas L.P. (2014) *Caracterización térmica de un edificio del centro bonaerense mediante mediciones y modelado analítico*. AVERMA 18, 05.19-28.
- Muñoz N., Thomas L.P., Marino B.M. (2015) *Comportamiento térmico dinámico de muros típicos empleando el método de la admitancia*. Energías Renovables y Medio Ambiente (ERMA) 36, 31-39.
- Muñoz N., Marino B.M., Thomas L.P. (2016) *Caracterización térmica de edificios aplicando el modelo de regresión lineal múltiple*. AVERMA 20, 05.21-32.
- Nota VM, Ledesma SL, Gonzalo GE, Martínez CF, Tortones AS (2003) *Evaluación del comportamiento higrotérmico, de asoleamiento y lumínico de edificios de oficinas en San Miguel de Tucumán*. Avances en energía Renovables y Medio Ambiente 7, 05.43-5.48
- O'Callaghan PW, Probert SD (1977) *Sol-air temperature*. Applied Energy 3, 307-311.
- O'Grady M, Lechowska AA, Harte AM (2017) *Quantification of heat losses through building envelope thermal bridges influenced by wind velocity using the outdoor infrared thermography technique*. Applied Energy 208, 1038-1052.
- O'Neill PJ, Crawley DB, Schliesing JS (1991) *Using regression equations to determine the relative importance of inputs to energy simulation tools*, en: Proceedings of the Building Simulation '91 Conference, pp. 283-289, Sophia-Antipolis, Niza, France.
- Ozel M, Pihtili K (2007) *Optimum location and distribution of insulation layers on building walls with various orientations*. Building and Environment 42 (8), 3051-3059.
- Ozisik MN, Orlande HRB (2000) *Inverse Heat Transfer: Fundamentals and Applications*. Taylor and Francis, New York.
- Palyvos JA (2008) *A survey of wind convection coefficient correlations for building envelope energy systems' modeling*. Applied Thermal Engineering 28 (8-9), 801-808.

- Peng C, Wu Z (2008) *In situ measuring and evaluating the thermal resistance of building construction*. Energy and Buildings 40, 2076-2082.
- Pinedo A, Díscoli C, Rosenfeld E (2001) *Edificios Inteligentes con integración de Variables y Diseño Energético. Revisión del Estado del Arte para un Modelo Local*. Avances en energías Renovables y Medio Ambiente 5 (1), 05.31–36.
- Pipes LA (1957) *Matrix analysis of heat transfer problems*. Journal of Franklin Institute 623, 195-206.
- Rahman Al-Kassir A, Fernandez J, Tinaut FV, Castro F (2005) *Thermographic study of energetic installations*, Applied Thermal Engineering 25, 183–190.
- Rodríguez Alonso S (2013) *La verdadera sustentabilidad*. Diario Clarín, Argentina. http://arq.clarin.com/arquitectura/verdadera-sustentabilidad_0_851915026.html,
- Rosina E, Spodek J (2009) *Using infrared thermography to detect moisture in historic masonry: a case study in Indiana*. APT Bulletin 34, 11–16.
- Salvetti MB, Czajkowski J, Gómez A (2010) *Ahorro de Energía en Refrigeración de Edificios para Oficinas. Propuesta de indicadores de Eficiencia y Valores Admisibles*. Avances en Energía Renovable y Medio Ambiente 14, 07.17-24.
- Sander DM, Cornick S, Newsham GR, Crawley DB (1993) *Developing a simple model to predict heating/cooling energy based on building envelope thermal characteristics*, en: Proceedings of the Building Simulation '93 Conference, pp. 223–230. A.E. Delsante, J.W. Mitchell y R.C. Van de Perre Editores. IBPSA Adelaida, Australia.
- Sanglier G (2003) *Aplicación de la termografía al estudio de pérdidas energéticas en edificios*. In: Teledetección y Desarrollo Regional, X Congreso de Teledetección, pp. 329–332.
- Sandrolini F, Franzoni E (2006) *An operative protocol for reliable measurements of moisture in porous materials of ancient buildings*. Building and Environment 41, 1372–1380.
- Saravia L, Alía D (2016) *Programa SIMUSOL – TUTORIAL Termodinámica, Mecánica, Electricidad*. Instituto de Investigación en Energías no Convencionales, Salta. <http://www.simusol.org/downloads/simusol-tutorial-2016.pdf>
- Shi X, Tian Z, Chen W, Si B, Jin X (2016) *A review on building energy efficient design optimization from the perspective of architects*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 65, 872–884
- Spencer JW (1971) *Fourier series representation of the position of the sun*. Search 2, 172-173.
- Spitler JD, Rees SJ, Xiao D (2001) *Development of an analytical verification test suite for whole building energy simulation programs-building fabric*. ASHRAE 1052-RP final report, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Tarantola A (2005) *Inverse problem theory and methods for model parameter estimation*. SIAM, Filadelfia.
- Tejedor B, Casals M, Gangoellés M, Roca X (2017) *Quantitative internal infrared thermography for determining in-situ thermal behaviour of façades*. Energy and Buildings 151, 187-197.

- Thomas G.E., Muñoz N., Marino B.M., Thomas L.P. (2018a) *Respuesta dinámica de los muros de la envolvente edilicia a variaciones diurnas de la temperatura exterior*. Anales AFA 29(1), 20-28.
- Thomas L.P., Marino B.M., Linden P.F. (2007a) *Ventilación natural de dos habitaciones: modelado teórico*. Anales AFA 18, 112- 119.
- Thomas L.P., Marino B.M., Linden P.F. (2007b) *Ventilación natural de dos habitaciones: modelado en el laboratorio y resultados experimentales*. Anales AFA 18, 120-126.
- Thomas L.P., Marino B.M. (2008) *Comportamiento térmico de una vivienda frente a variaciones importantes de temperatura en verano*. AVERMA 12, 05.25-32. ISSN 2314-1433
- Thomas L.P., Marino B.M., Tovar R., Castillo J.A., Rojas J. (2009) *Visualización de plumas y medición de gradientes térmicos por medio de schlieren sintético*. AVERMA 13, 08.139-145.
- Thomas L.P., Marino B.M., Tovar R., Castillo J.A. (2011) *Convection generated by a small heat source in a box with a cooled upper contour at constant temperature*. IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series 296: 012022 (12 pp).
- Thomas L.P., Marino B.M., Tovar R., Castillo J.A. (2012) *Modelado analítico de la ventilación en una habitación con techo frío y fuente de calor, conectada al exterior*. AVERMA 16, 08.57-64.
- Thomas L.P., Marino B.M., Muñoz N. (2014) *Cuantificación de las resistencias térmicas superficiales y pérdidas de calor por conducción en edificios aplicando termografía*. AVERMA 18, 05.55-64.
- Thomas JW (1995) *Numerical Partial Differential Equations: Finite Difference Methods*. Texts in Applied Mathematics, Vol. 22, Springer-Verlag, Nueva York.
- Tiberiu C, Vlad I, Caracaleanu B (2013) *Multiple Regression model for fast prediction of the heating energy demand*. Energy and Buildings 57, 302-312.
- Trujillo DM, Busby HR (1997) *Practical Inverse Analysis in Engineering*. CRC Press, Boca Raton.
- Tzempelikos A, Athienitis AK (2007) *The impact of shading design and control on building cooling and lighting demand*. Solar Energy 81 (3), 369-382.
- UNEP- SBCI United Nations Environment Programme, Sustainable Buildings & Climate Initiative (2009) *Buildings and Climate Change. Summary for Decision-Makers*. Available from: <http://www.unep.org/sbci/pdfs/SBCI-BCCSummary.pdf>
- Urbikain MK, Davies MG (2008) *One-dimensional solutions to Fourier's equation and measures of heat transmission through walls: The role of wall decay times*. Building and Environment 43, 1433-1445.
- Volantino VL, Cornejo Siles EJ (2007) *Ahorro energético inherente a infiltraciones de aire por correcciones en el diseño de carpinterías utilizadas en viviendas de interés social*. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 11, 08.51-57.
- Weigand B (2015) *Analytical methods for heat transfer and fluid flow problems*. 2^{da} Ed, Springer, Berlin.

Whiten B (2013) *Model completion and validation using inversion of grey box models*. ANZIAM Journal 54, 187-199.

Woodbury K (2002) *Inverse Engineering Handbook*. CRC Press, Boca Raton.

Yan C, Wang S, Shan K, Lu Y (2015) *A simplified analytical model to evaluate the impact of radiant heat on building cooling load*. Applied Thermal Engineering 77, 30-41.

